



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

JOÃO VICTOR MELO DO NASCIMENTO

**MODELAGEM DE UM REATOR DE SATURAÇÃO NATURAL POR MEIO DE
ENSAIOS EM LABORATÓRIO**

Recife

2025

JOÃO VICTOR MELO DO NASCIMENTO

**MODELAGEM DE UM REATOR DE SATURAÇÃO NATURAL POR MEIO DE
ENSAIOS EM LABORATÓRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Antônio Magnata da Fonte

Recife
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Melo do Nascimento, João Victor .

Modelagem de um Reator de saturação natural por meio de ensaios em
laboratório / João Victor Melo do Nascimento. - Recife, 2025.
108p. : il., tab.

Orientador(a): Vicente Ribeiro simoni

Coorientador(a): Luiz Antônio Magnata da Fonte

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de
Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia Elétrica -
Bacharelado, 2025.

Inclui referências, apêndices.

1. Reator de Saturação Natural. 2. Modelagem ATP. 3. Ensaios de
Laboratório. 4. Curva de Magnetização. 5. Automação de Simulação. I. Ribeiro
simoni, Vicente. (Orientação). II. Magnata da Fonte, Luiz Antônio. (Coorientação).
IV. Título.

620 CDD (22.ed.)

JOÃO VICTOR MELO DO NASCIMENTO

**MODELAGEM DE UM REATOR DE SATURAÇÃO NATURAL POR MEIO DE
ENSAIOS EM LABORATÓRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Departamento de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal de Pernambuco, como
requisito parcial para obtenção do grau de
Engenheiro Eletricista.

Aprovado em: 15/12/2025

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vicente Ribeiro Simoni (orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Zanon Dueire Lins (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Eng. M.Sc. Ercles Mauricio Barbosa (Examinador externo)
Universidade Federal de Pernambuco

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, registro minha imensa gratidão à minha **mãe**, pelo apoio incondicional e por todo o suporte, que foram essenciais para a conclusão desta jornada de graduação e para o meu desenvolvimento.

Ao meu orientador, **Professor Doutor Vicente Ribeiro Simoni**, meus sinceros agradecimentos pelos ensinamentos, pela confiança, pelas oportunidades concedidas e pela inestimável dedicação em guiar não apenas o desenvolvimento deste trabalho, mas também a minha formação como Engenheiro.

Agradeço, igualmente, ao coorientador **Luiz Antônio Magnata da Fonte**, pela valiosa ajuda na elucidação de dúvidas e na disponibilização de material crucial ao longo de todo o projeto.

Por fim, mas com igual importância, expresso minha profunda gratidão ao técnico de laboratório, **Marcos André**, pela indispensável assistência com equipamentos, montagens e ensaios, e pela companhia motivadora em diversos momentos desafiadores no laboratório.

.

RESUMO

O controle de tensão em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) enfrenta desafios, e os Reatores de Saturação Natural (RSN) surgem como uma solução promissora. Contudo, a modelagem computacional precisa desses equipamentos, especialmente em regimes transitórios, carece de validação experimental detalhada. Este trabalho teve como objetivo principal desenvolver e validar um modelo computacional de um protótipo de RSN de 9 núcleos, modelo Siemens, no programa *Alternative Transients Program* (ATP). A metodologia foi fundamentada na caracterização do protótipo físico por meio de ensaios laboratoriais realizados no Laboratório de Estruturas Magnéticas (LEM) da UFPE. Foram executados o ensaio de resistência em corrente contínua (CC), o ensaio de curto-circuito para determinação da reatância de dispersão, e o levantamento da curva de magnetização (V-I) para caracterizar a não linearidade do núcleo.

Os parâmetros experimentais obtidos (R, L e curva V-I) foram utilizados para parametrizar o modelo no ATP. Um dos desafios foi a validação da curva V-I simulada, que exigia a execução de 25 simulações distintas. Para otimizar este processo, o autor desenvolveu um programa computacional dedicado que automatiza a geração de casos, a execução sequencial das simulações no ATP e a coleta dos dados de saída em planilha. Foram analisados nove cenários de simulação, incluindo uma análise de sensibilidade e ajustes na curva de saturação. O "Modelo Final" (Cenário 9), construído com novos dados experimentais focados na região de saturação, alcançou uma aderência satisfatória à curva experimental. Concluiu-se que a correta caracterização da curva V-I não linear é o fator dominante para a fidelidade do modelo, que apresentou baixa sensibilidade às variações dos parâmetros lineares R e L.

Palavras-chave: Reator de Saturação Natural; Modelagem ATP; Ensaios de Laboratório; Curva de Magnetização; Automação de Simulação.

ABSTRACT

Voltage control in Electrical Power Systems faces challenges, and Natural Saturation Reactors emerge as a promising solution. However, the accurate computational modeling of these devices, especially in transient regimes, lacks detailed experimental validation. This work aimed to develop and validate a computational model of a 9-core NSR prototype, Siemens model, in the Alternative Transients Program (ATP). The methodology was based on the characterization of the physical prototype through laboratory tests carried out at the Magnetic Structures Laboratory of UFPE. The direct current resistance test, the short-circuit test to determine the leakage reactance, and the magnetization curve (V-I) were performed to characterize the non-linearity of the core.

The experimental parameters obtained (R, L and V-I curve) were used to parameterize the model in ATP. One of the challenges was validating the simulated V-I curve, which required running 25 distinct simulations. To optimize this process, the author developed a dedicated computer program that automates case generation, sequential execution of simulations in ATP, and collection of output data in a spreadsheet. Nine simulation scenarios were analyzed, including a sensitivity analysis and adjustments to the saturation curve. The "Final Model" (Scenario 9), built with new experimental data focused on the saturation region, achieved satisfactory adherence to the experimental curve. It was concluded that the correct characterization of the non-linear V-I curve is the dominant factor for the model's fidelity, which showed low sensitivity to variations in the linear parameters R and L.

Keywords: Natural Saturation Reactor; ATP Modeling; Laboratory Tests; Magnetization Curve; Simulation Automation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distribuição da FMM num reator de 9 núcleos.	19
Figura 2 – Ligação dos enrolamentos.	19
Figura 3 – Foto do RSN Siemens.	20
Figura 4 – Foto do RSN Siemens.	20
Figura 5 – Foto do RSN Siemens.	21
Figura 6 – Foto do RSN Siemens.	21
Figura 7 – Localização e número de espiras dos enrolamentos N0, N1, N2 e N3. ...	23
Figura 8 - Circuito magnético simples.....	24
Figura 9 – (a) Curva de magnetização. (b) Curva de magnetização expressa em termos de densidade de fluxo e intensidade de campo magnético.....	27
Figura 10 – Curva da permeabilidade relativa em função da intensidade de campo. [5].....	28
Figura 11 – Curva de histerese. [5].....	29
Figura 12 – Circuito de um transformador ideal. [4].	30
Figura 13 – Circuito equivalente de um Transformador.	33
Figura 14 – Ensaio de Curto-Circuito.....	34
Figura 15 – Ensaio de Circuito Aberto.	35
Figura 16 – reator linear, não linear e saturado.....	36
Figura 17 – Varivolt (25 A).	40
Figura 18 – Placa Varivolt (25A).	40
Figura 19 – Ponte retificadora.....	41
Figura 20 – Capacitor.....	42
Figura 21 – Multímetro Minipa ET-2233.	43
Figura 22 – Multímetro Fluke 87V.	44
Figura 23 – Diagrama elétrico medição de resistência em corrente contínua.	45
Figura 24 – Medição de resistência em corrente contínua.	45
Figura 25 – Variolt (50 A).	48
Figura 26 – Placa Varivolt (50A).	49
Figura 27 – Qualimetro Fluke 435 series II.	49
Figura 28 – Garra de tensão do Qualimetro Fluke CAT III 1000V.	50
Figura 29 – Garra de corrente I5S de 10A do Qualimetro Fluke.....	50
Figura 30 – Garra de corrente I430-FLEXI-TF-II de 300A do Qualimetro Fluke.	51

Figura 31 – Valor de tensão e corrente do ensaio na Bobina N0 coluna I.	51
Figura 32 –Valor das potencias do ensaio na Bobina N0 coluna I.	52
Figura 33 –Curva de magnetização bobina N0.	56
Figura 34 – Curva de magnetização bobina N1.	56
Figura 35 – Curva de magnetização bobina N2.	57
Figura 36 – Curva de magnetização bobina N3.	57
Figura 37 – Curva de magnetização bobina N0 para coluna I e coluna IV.	58
Figura 38 – Curva de magnetização bobina N1 para coluna II e coluna V.	58
Figura 39 – Curva de magnetização bobina N1 e N0 referenciada para N1.	59
Figura 40 – Transformador a seco.	60
Figura 41 –Placa do Transformador.	61
Figura 42 – Cubículo de medição.	62
Figura 43 – Cubículo de medição aberto.	63
Figura 44 – Diagrama elétrico do Circuito montado.	63
Figura 45 –Curva de magnetização Reator Siemens.	65
Figura 46 –Reator Siemens modelado no ATPDraw.	69
Figura 47 –Modelo da coluna para 3 enrolamento.	70
Figura 48 – Interface do programa computacional.	72
Figura 49 – Sobreposição de todas as curvas Vxl.	73
Figura 50 – Comparação da Curva Vxl Caso Base.	75
Figura 51 – Comparação da Curva Vxl Cenário 2.	77
Figura 52 – Comparação da Curva Vxl Cenário 3.	79
Figura 53 – Comparação da Curva Vxl: Cenário 4 (R min, L min).	80
Figura 54 – Comparação da Curva Vxl: Cenário 5 (R max, L max).	81
Figura 55 – Comparação da Curva Vxl: Cenário 6 (R min, L max). Fonte: Autor.	82
Figura 56 – Comparação da Curva Vxl: Cenário 7 (R max, L min).	83
Figura 57 – Comparação da Curva Vxl: Cenário 8 (Extrapolação).	85
Figura 58 – Comparação da Curva Vxl: Cenário 9 (Modelo Final com Novos Dados).	88
Figura 59 – Forma de onda de corrente do Modelo Final para 1 fase.	88
Figura 60 – Forma de onda de corrente do Modelo Final para 1 fase (Zoom).	89
Figura 61 – Forma de onda de corrente do Modelo Final para 3 fases.	89
Figura 62 – Forma de onda de corrente do Modelo Final para 3 fases (zoom).	90
Figura 63 – Espectro harmônico do modelo simulado.	90

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de Resistencia medidos por Villa Verde [3].....	46
Tabela 2 – ensaio de Resistencia em Corrente continua.	46
Tabela 3 – Valores de Resistencia calculado a partir do ensaio em Corrente Continua.	46
Tabela 4 – Valores de resistência e reatância de dispersão obtidas nos ensaios de Curto-circuito.	54
Tabela 5 –Valores medido do Reator Siemens.	64
Tabela 6 –Valores utilizados de resistência e reatância utilizado para o caso base.	67
Tabela 7 –Valores de Fluxo-corrente da bobina N0.	67
Tabela 8 – Valores de Fluxo-corrente da bobina N1.	68
Tabela 9 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N0.	73
Tabela 10 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N1.	74
Tabela 11 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N0 gerado da interpolação com N2.	76
Tabela 12 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N1 gerado da interpolação com N2.	76
Tabela 13 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N0 gerado da interpolação com N2.	78
Tabela 14 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N1 gerado da interpolação com N2.	78
Tabela 15 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N0 (com extrapolação).	83
Tabela 16 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N1 (com extrapolação).	84
Tabela 17 – Tensão e Corrente medida na Bobina N0.	85
Tabela 18 – Tensão e Corrente medida na Bobina N1.	86
Tabela 19 – Tensão e Corrente do Cenário 1 (Modelo Base).	102
Tabela 20 – Tensão e Corrente do Cenário 2 ($\alpha = 0,5$).	102
Tabela 21 – Tensão e Corrente do Cenário 3 ($\alpha = 0,3$).	103
Tabela 22 – Tensão e Corrente do Cenário 4 (R min, L min).	104
Tabela 23 – Tensão e Corrente do Cenário 5 (R max, L max).	104
Tabela 24 – Tensão e Corrente medida do Cenário 6 (R min, L max).	105

Tabela 25 – Tensão e Corrente do Cenário 6 (R max, L min).	106
Tabela 26 – Tensão e Corrente do Cenário 8 (Extrapolação).....	107
Tabela 27 – Tensão e Corrente do Cenário 9 (Modelo Final).	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ATP	Alternative Transients Program
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FEM	Finite Element Method
FMM	Força Magnetomotriz
GNO	Grão Não Orientado
GO	Grão Orientado
HGO	Alta Permeabilidade
LDSP	Laboratório Digital de Sistemas de Potência
LEM	Laboratório de Estruturas Magnéticas
NBR	Norma Brasileira
PU	Por unidade
RSN	Reator de Saturação Natural
SATTRAFO	Saturable Transformer Component
SEP	Sistema Elétrico de Potência
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO	16
1.2	OBJETIVOS	16
1.2.1	Geral	16
1.2.2	Específico	16
1.3	Organização do Trabalho	17
2	Revisão da literatura	18
3	Referencial teórico	24
3.1	Circuitos Magnéticos	24
3.2	Materiais ferromagnéticos	26
3.3	Ensaio em Transformador	30
3.3.1	Ensaio de curto-circuito	33
3.3.2	Ensaio de circuito aberto	35
3.4	Reator saturado	36
4	Desenvolvimento	38
4.1	Laboratório	38
4.1.1	Ensaio de resistência em corrente contínua	39
4.1.2	Ensaio de Curto-Circuito	47
4.1.3	Curva V_{xl}	54
4.1.3.1	Ensaio monofásico por coluna	54
4.1.3.2	Ensaio no equipamento trifásico	59
4.2	Simulação	65
4.2.1	Modelagem computacional no ATP	66
4.2.2	Programa computacional	71
4.2.3	Comparação dos resultados	72
4.2.3.1	Cenário 1: Modelo Base	73
4.2.3.2	Cenário 2: Interpolação com curva N2 ($\alpha = 0,5$)	75

4.2.3.3	Cenário 3: Ajuste da Interpolação ($\alpha = 0,3$)	77
4.2.3.4	Cenário 4-7: Análise de Sensibilidade aos Parâmetros R e L	79
4.2.3.5	Cenário 8: Extrapolação da curva de saturação (Modelo Base)	83
4.2.3.6	Cenário 9: Modelo Final	85
5	Conclusão	91
5.1	<i>Propostas de Continuidade</i>	91
	REFERÊNCIAS	93
	APÊNDICE A	94
	APÊNDICE B	96
	APÊNDICE C	102

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) brasileiro, que se destaca por suas linhas de transmissão extensas e predominância da geração hidrelétrica, enfrenta grandes desafios na regulação de tensão, principalmente em linhas longas e de extra alta tensão, devido ao efeito Ferranti em condições permanentes e em situações transitórias. Tradicionalmente, a regulação de tensão tem sido feita por reatores lineares e bancos de capacitores paralelos. Embora essas soluções sejam eficazes, as soluções exigem manobras constantes que geram solicitações transitórias e manutenção frequente.

Nesse contexto, os Reatores de Saturação Natural (RSN) surgem como uma tecnologia promissora, pois, sua característica de não linearidade tensão-corrente possibilita uma regulação contínua da tensão sem a necessidade de chaveamento, com baixíssima absorção de potência reativa durante a operação em carga pesada e tensão terminal abaixo do limiar de saturação e alta absorção durante ciclos de carga leve e elevação natural da magnitude de tensão do sistema de transmissão em alta tensão. Embora seja uma tecnologia consolidada desde o início do século XX, o uso de RSN de alta potência no SEP ainda é restrito. Além disso, há poucas pesquisas aprofundadas sobre sua modelagem e, principalmente, sobre a validação de seu desempenho em regimes transitórios, por meio de comparações entre simulações e dados reais.

A topologia de RSN com nove núcleos tem sido reconhecida como a mais adequada para sistemas de potência conforme os estudos feitos no âmbito do Laboratório Digital de Sistemas de Potência (LDSP) da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Dada sua capacidade de mitigar componentes harmônicas, pois, quanto maior for número de núcleos menor será o teor harmônico observado na corrente de alimentação conforme descreveu Fonte [1]. O presente estudo foca na análise do comportamento transitório de um RSN de 9 núcleos em série, especificamente o protótipo construído pela Siemens, cuja concepção e construção foram realizadas no LDSP e o modelo adotado para construção foi detalhada por Fonte [1] e o equipamento já construído por Villa Verde [3].

O objetivo deste trabalho é obter, a partir de ensaios no Laboratório de Estruturas Magnéticas (LEM) da UFPE as características elétricas do protótipo de RSN de 9 núcleos construído pela Siemens, de forma a ser possível representar em detalhe o

equipamento no programa *Alternative Transients Program* (ATP). A partir do modelo ATP, espera-se ser possível reproduzir de forma adequada os comportamentos de regime permanente e regime transitório em ambiente de simulação.

1.1 MOTIVAÇÃO PARA O ESTUDO

A motivação para o estudo veio da falta de material relacionado a ensaios em reatores saturados, buscando assim tentar sintetizar os conhecimentos obtidos ao longo do curso trazendo testes e ensaios em laboratório para encontrar um meio de modelar de maneira coerente um reator de saturação natural por meio de ensaios em laboratório.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objeto de estudo deste trabalho é caracterizar eletricamente o RSN de 9 núcleos e ligação série, protótipo fabricado pela Siemens, cuja concepção e construção foram detalhadamente apresentadas por Villa Verde (2008) em sua dissertação de mestrado. Este protótipo, fisicamente disponível no LEM da UFPE, servirá como base para a modelagem computacional em ATP e para a realização dos ensaios de regime permanente e de regime transitório.

1.2.2 Específico

O presente estudo tem o intuito da verificação do levantamento de um modelo em ATP a partir de ensaios em laboratório do protótipo.

Os objetivos incluem:

- Levantar o valor das resistências de cada enrolamento do reator;
- Realizar o ensaio para calcular a reatância de dispersão de cada um dos enrolamentos;
- Levantar a curva V_{xl} do núcleo ferromagnético utilizado;
- Desenvolver um modelo de simulação em ATP.

1.3 Organização do Trabalho

O presente trabalho encontra-se estruturado de acordo com a seguinte distribuição de capítulos:

No capítulo 2 é apresentado a revisão literária com informações coletadas de diferentes fontes, incluindo trabalhos com o protótipo Siemens usado para esta pesquisa.

O capítulo 3 consiste no referencial teórico, contendo os fundamentos essenciais e está dividido em 4 partes: Circuitos magnéticos, Materiais ferromagnéticos, Ensaio em transformadores e Reator saturado. A primeira seção aborda os circuitos magnéticos e os fundamentos importantes que abrangem este conteúdo para nivelar e relembrar o conhecimento ao leitor. A segunda seção consiste numa breve revisão sobre materiais magnéticos introduzindo o conceito de curva histerese, curva de magnetização e grão orientado. A quarta seção descreve sucintamente o comportamento de estado permanente do RSN quando confrontado com o reator linear.

O capítulo 4 é dedicado ao desenvolvimento do trabalho, comentando sobre o reator saturado utilizado para ensaio juntamente com os equipamentos de medição e fonte, descrevendo métodos usados em cada ensaio para levantamento dos parâmetros e curvas utilizadas para modelar um RSN.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões da pesquisa, trazendo sugestões e possíveis investigações futuras, que buscam aprofundar ou expandir os temas abordados no presente trabalho.

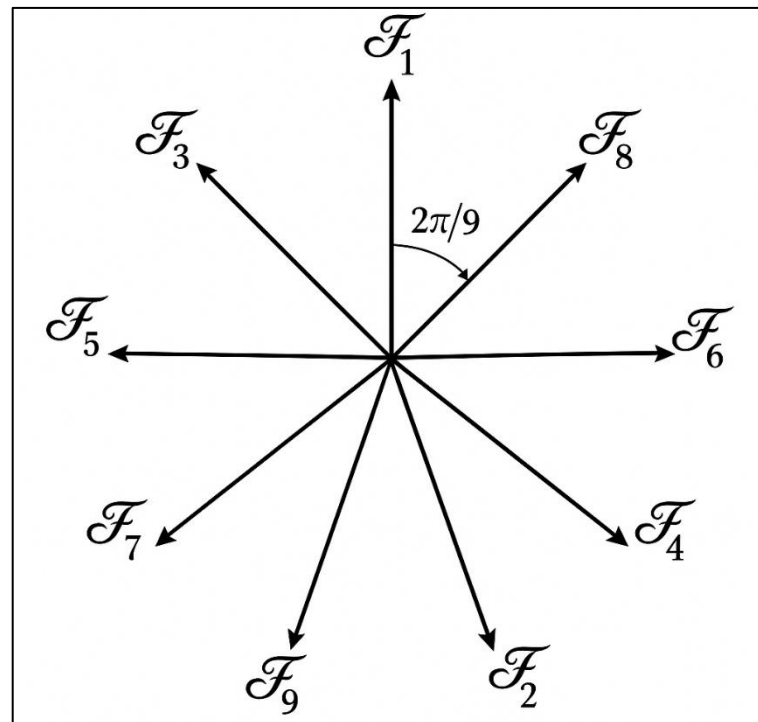
2 REVISÃO DA LITERATURA

Conforme explicitado por Fonte [1], o modelo matemático mais apropriado para a representação dos RSNs para simulações é aquele que trata cada núcleo como um transformador de múltiplos enrolamentos. Este modelo, proposto por Brasil [2], é diretamente implementável no ATP, sendo conhecido como *Saturable Transformer Component* (SATTRAFO) em sua biblioteca. A validade do modelo de núcleos independentes para o RSN, mesmo em estruturas de único núcleo ferromagnético, é assegurada pelo princípio da mútua compensação harmônica. Esse princípio, conforme Fonte [1], garante que as travessas e retornos da estrutura magnética não saturem, atuando como um curto-circuito magnético e mantendo a independência entre as colunas.

A validade do modelo para estudo de regime transitório foi comprovada por Fonte [1] por meio de ensaios de sobrecarga no protótipo 1. Nestes testes, mesmo com correntes elevadas, a condição de curto-circuito magnético das travessas e retornos foi mantida, assegurando a independência das colunas e a aplicabilidade do modelo para tensões e correntes mais elevadas.

O reator saturado Siemens disponível no LEM é um RSN de nove núcleos, as suas bobinas estão interligadas em série de modo que as FMM geradas em cada coluna sejam iguais e defasadas de $\frac{2\pi}{9}$. O método de construção deste reator foi proposto por Fonte [1], e as FMM ficam conforme a Figura 1.

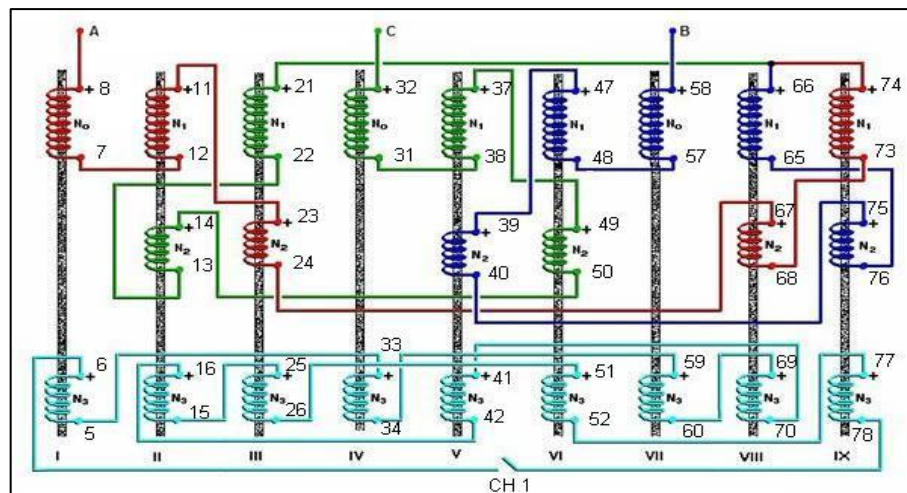
Figura 1 – Distribuição da FMM num reator de 9 núcleos.



Fonte: Adaptado de [1].

O reator possui bobinas com diferentes números de espira, a saber N_0 , N_1 , N_2 e N_3 . As bobinas N_3 são bobinas secundárias e as bobinas N_0 , N_1 e N_2 são denominadas de primárias, o modelo utilizado por Fonte [1] para modelar o número de espiras é feito a partir do número de N_0 , pois as bobinas N_1 e N_2 formam uma composição para gerar a mesma FMM que N_0 . O arranjo do reator com as suas interligações pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 – Ligação dos enrolamentos.



Fonte: Adaptado de [3].

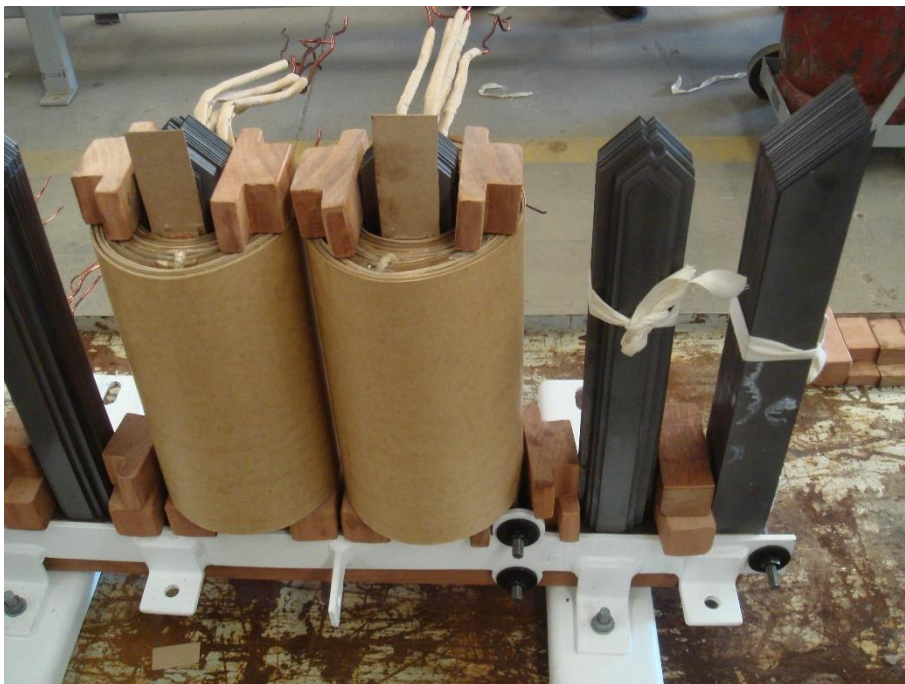
As imagens do reator podem ser vistas da Figura 3 a Figura 6.

Figura 3 – Foto do RSN Siemens.



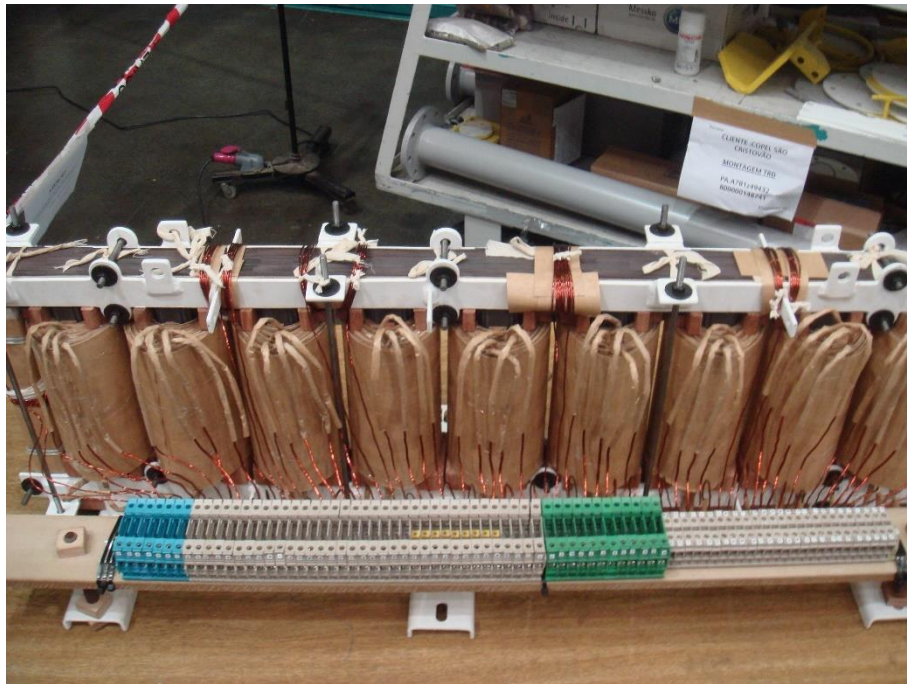
Fonte: Adaptado de [3].

Figura 4 – Foto do RSN Siemens.



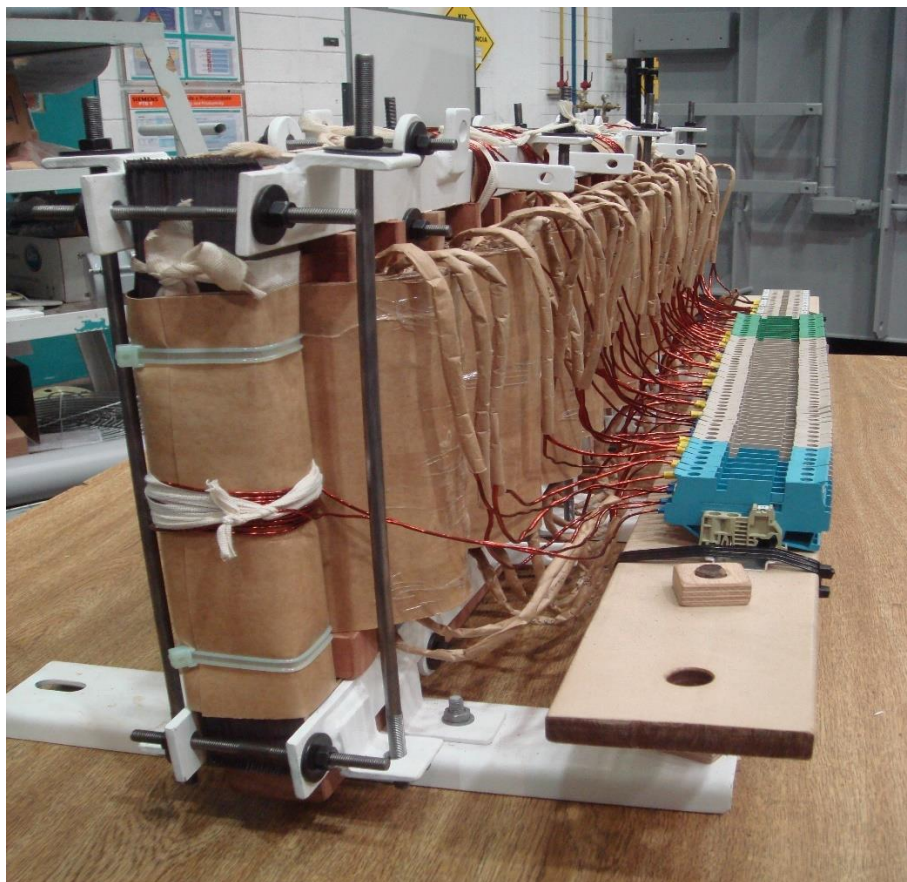
Fonte: Adaptado de [3].

Figura 5 – Foto do RSN Siemens.



Fonte: Adaptado de [3].

Figura 6 – Foto do RSN Siemens.



Fonte: Adaptado de [3].

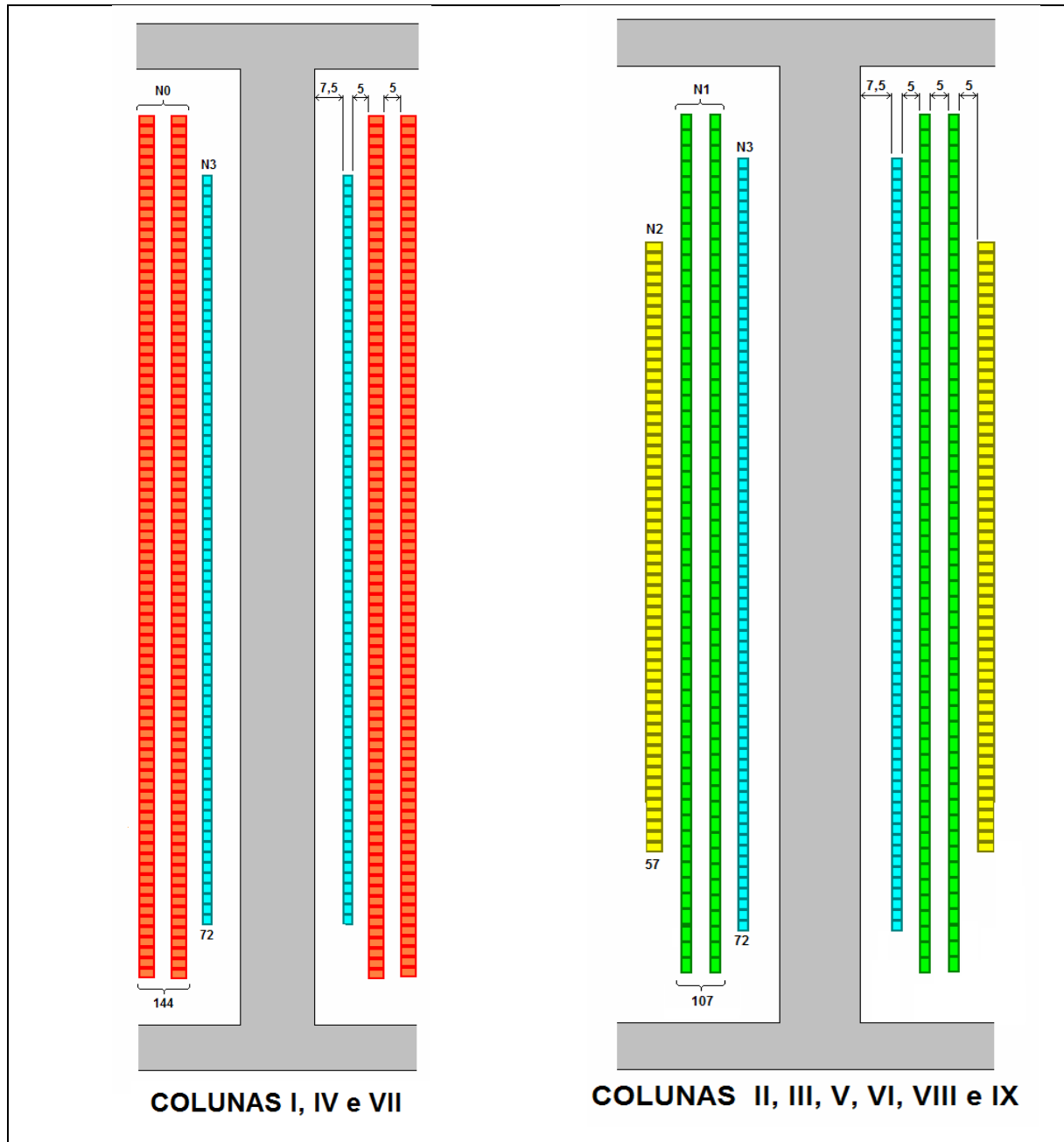
Para determinar o número de espiras de cada enrolamento, Fonte em [1] explica que são determinados a partir de um enrolamento denominado de referência, cujo número de espiras é definido de forma tal que atuando sozinho produzira uma FMM de intensidade igual àquela existente nos núcleos do reator, essa bobina é a bobina N0, por meio disso Fonte definiu a equação que deduz o número de espiras de N1 e N2 a partir do valor de N0.

$$N_1 = \frac{2}{\sqrt{3}} N_0 \cos \left(\frac{\pi}{6} + \frac{\pi}{9} \right) \quad (2.1)$$

$$N_2 = \frac{2}{\sqrt{3}} N_0 \cos \left(\frac{\pi}{6} + \frac{2\pi}{9} \right) \quad (2.2)$$

A posição de cada bobina nas colunas para 2 enrolamentos e para 3 enrolamentos juntamente com o número de espiras encontrasse na Figura 7.

Figura 7 – Localização e número de espiras dos enrolamentos N0, N1, N2 e N3.



Fonte: Adaptado de [3].

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O objetivo deste capítulo é apresentar a fundamentação teórica e aspectos de um reator saturado.

3.1 Circuitos Magnéticos

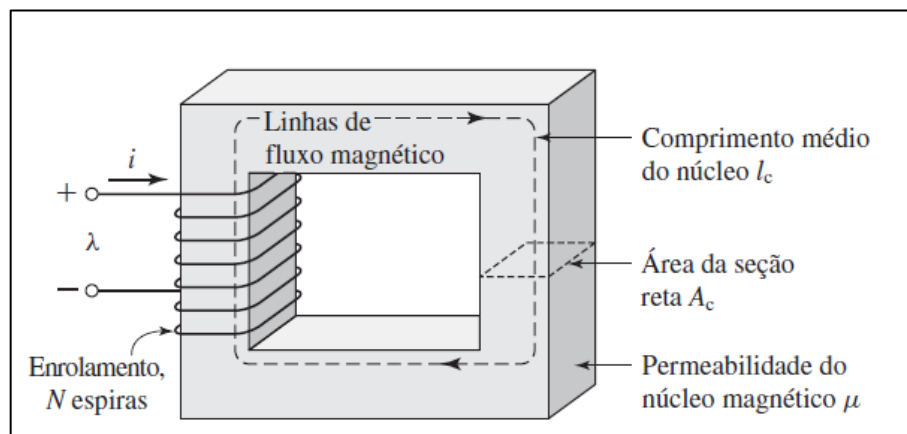
O estudo dos circuitos magnéticos é essencial para entender transformadores e reatores. Esses circuitos são estruturas compostas por material magnético de permeabilidade muito elevada em comparação com o ar. O uso desses materiais é fundamental, pois concentram e direcionam os campos magnéticos, atuando como um meio de transferência e conversão de energia.

Para a análise de circuitos magnéticos, utiliza-se um modelo fundamental que consiste em um núcleo de material com alta permeabilidade magnética (μ), muito superior à do ar. Enrolada neste núcleo, uma bobina de N espiras é percorrida por uma corrente i , gerando uma Força Magnetomotriz (FMM). Essa FMM estabelece um campo magnético que, pela alta permeabilidade do material, circula quase que totalmente dentro do núcleo, Conforme mostra a Figura 8 [4].

A relação entre a FMM e a intensidade de campo magnético H ao longo do comprimento médio do núcleo l pode ser expresso como [4]:

$$FMM = Ni = Hl \quad (3.1)$$

Figura 8 - Circuito magnético simples.



Fonte: Adaptado de [4].

Para simplificar a análise, adota-se a premissa de que a densidade média de fluxo B na seção transversal A do núcleo. Com isso, o fluxo magnético total (Φ) pode ser calculado simplesmente pelo produto entre essas duas grandezas:

$$\phi = BA \quad (3.2)$$

em que

ϕ é o *fluxo no núcleo*;

B é a *densidade de fluxo do núcleo*;

A é a *área da seção reta do núcleo*.

A intensidade de campo magnético H e a densidade de fluxo B são relacionadas pela permeabilidade magnética μ do material, conforme a equação [4]:

$$B = \mu H \quad (3.3)$$

Como resultado, a integral de linha torna-se simplesmente o produto escalar Hl do módulo de H vezes o comprimento médio do caminho do fluxo. Assim a relação entre a FMM e a intensidade de campo magnético pode ser escrita, na terminologia dos circuitos magnéticos como o produto escalar das duas grandezas.

A relação entre a intensidade de campo H e a densidade de fluxo magnético é uma propriedade do material em que se encontra o campo magnético, denominado de permeabilidade magnética do material e simbolizado por μ . Mesmo a relação sendo não linear, costuma-se supor uma relação linear.

Em unidades no SI, H é medido em ampères por metro ($\frac{A}{m}$), B em weber por metro quadrado ($\frac{Wb}{m^2}$) e μ é medido em henry por metro ($\frac{H}{m}$).

É possível simplificar as análises de circuitos magnéticos por meio de uma analogia direta com circuitos elétricos. Nesta analogia, a Força Magnetomotriz (FMM) é análoga a Tensão (V), o Fluxo magnético (ϕ) é análogo a corrente (I), e a oposição ao fluxo é representada pela Relutância (\mathcal{R}), que é análoga a Resistência (R) [4].

A relutância de um caminho magnético depende de suas dimensões e da permeabilidade do material. Considerando um trecho de comprimento l , área de seção reta A e permeabilidade μ , a relutância é dada por [4]:

$$\mathcal{R} = \frac{l}{\mu A} \quad (3.4)$$

Dessa forma, a relação entre FMM, fluxo e relutância de um circuito magnético se assemelha a lei de ohm de um circuito elétrico [4].

$$FMM = \mathcal{R}\phi \quad (3.5)$$

Enquanto a relutância descreve as propriedades do caminho magnético, a indutância (L) é a propriedade do circuito elétrico que quantifica a relação entre fluxo concatenado (λ) produzido e a corrente (i) que o gera. O fluxo concatenado é o fluxo total que atravessa as N espiras do enrolamento ($\lambda = N\phi$). A indutância é definida como [4]:

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \quad (3.6)$$

A partir da definição de indutância, percebe-se que a indutância aumenta com o quadrado do número de espiras, mas diminui com o aumento da relutância do circuito, a partir do valor da relutância é possível calcular a reatância indutiva (X_L) de um circuito em corrente alternada, dado por:

$$X_L = \omega L = 2\pi f L \quad (3.7)$$

3.2 Materiais ferromagnéticos

Ao abordar circuitos magnéticos, foi introduzido o conceito de permeabilidade magnética. No caso comentado anteriormente, assumiu-se que a permeabilidade magnética é constante, independente da FMM aplicada ao material. A permeabilidade é constante no vácuo, porém, em materiais magnéticos a permeabilidade varia de acordo com a FMM aplicada [5]:

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (3.8)$$

Em que:

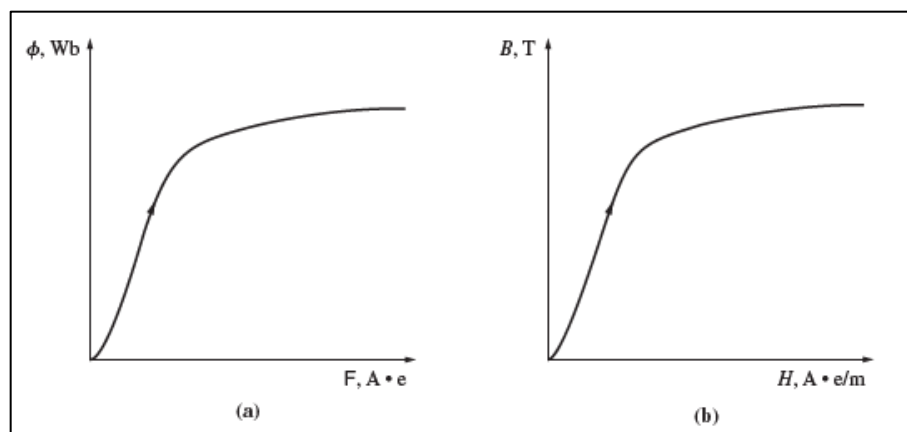
μ é a permeabilidade magnética do material;

μ_r é a permeabilidade relativa ;

μ_0 é a permeabilidade do vácuo, cujo valor é $4\pi \times 10^{-7}$.

A permeabilidade de um material ferromagnético altera-se com a FMM aplicada a ele. Ao se construir uma curva variando a FMM e medindo o fluxo, obtém-se um gráfico chamado curva de magnetização do material (BxH) ou curva de saturação do equipamento (VxI). Essa curva tem dois trechos praticamente lineares e uma região de grande não linearidade, a região de saturação. A região de início de saturação marca a transição entre as características do equipamento antes e após a saturação do núcleo ferromagnético. Essa região de transição é usualmente referida em projetos de transformadores de potência como o joelho da curva de saturação, associado a uma tensão de início de saturação tipicamente entre 115% e 130% da tensão nominal do equipamento. A região anterior e posterior ao joelho são regiões lineares, sendo a região anterior ao joelho uma região que um aumento na FMM gera um pequeno aumento no fluxo, já na região posterior um pequeno aumento na FMM gera um grande aumento no fluxo, e a interconexão entre essas duas regiões lineares é o joelho da curva, que é uma região não linear. A Figura 9 mostra a curva característica de um material ferromagnético [5].

Figura 9 – (a) Curva de magnetização. (b) Curva de magnetização expressa em termos de densidade de fluxo e intensidade de campo magnético.



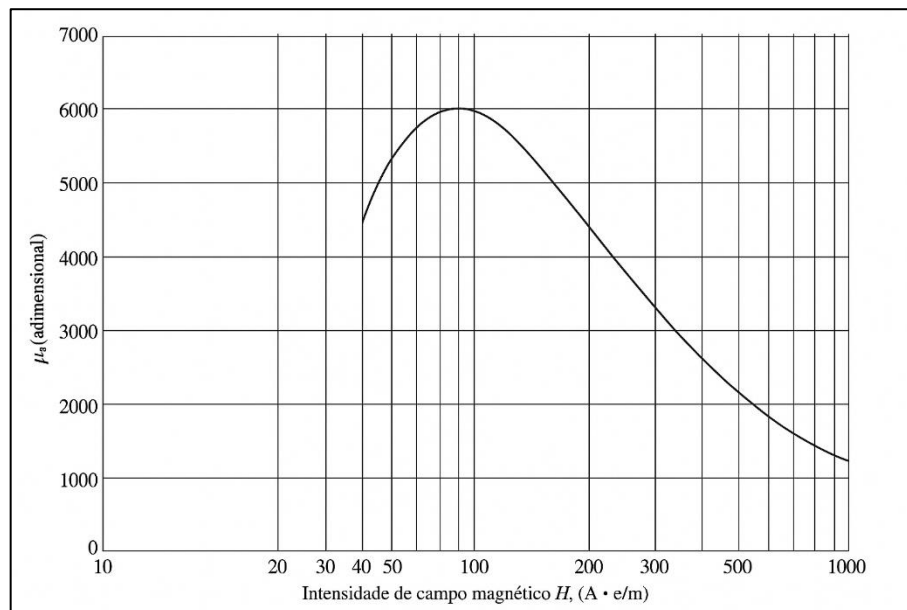
Fonte: Adaptado de [5].

Ao analisar a Figura 9 e utilizar da Equação 3.3 e a Equação 3.8 deixando em destaque a permeabilidade relativa, podemos então construir agora uma nova

equação e utilizando os dados da Figura 9 (b) construir uma nova curva agora da permeabilidade em função do campo magnético, mostrando que a permeabilidade relativa de um material varia com a FMM aplicada a ele, conforme mostrado na Figura 10 [5].

$$\mu_r = \frac{B}{\mu_0 H} \quad (3.9)$$

Figura 10 – Curva da permeabilidade relativa em função da intensidade de campo. [5].



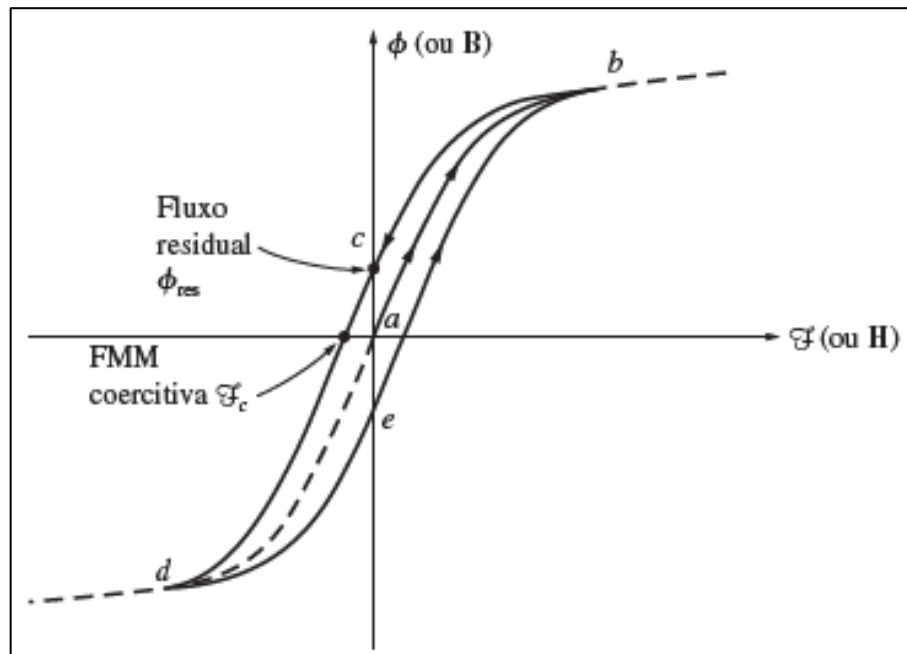
Fonte: Adaptado de [5].

Em circuitos magnéticos excitados por corrente alternada (CA), a relação entre a indução magnética (B) e a intensidade de campo magnético (H) é marcadamente não-linear. Partindo de um estado desmagnetizado, a magnetização inicial segue uma trajetória central, conhecida como curva de primeira magnetização. Nos ciclos de CA subsequentes, contudo, a relação B-H passa a descrever um laço fechado, conforme ilustrado na Figura 11 [5].

Esse comportamento é denominado histerese, e a trajetória B-H resultante é o laço de histerese. O fenômeno ocorre, pois, após a aplicação de um campo H e sua subsequente remoção, o material retém uma indução magnética residual (ou remanente). Esta remanência é uma propriedade macroscópica que resulta da inércia na reorientação dos domínios magnéticos no material ferromagnético, que não retornam completamente ao seu estado aleatório original [5].

Para promover o movimento das paredes de domínio e a rotação dos vetores de magnetização contra as forças de atrito internas do material, é necessário consumir energia, que é dissipada na forma de calor. A área interna do laço de histerese é, portanto, numericamente igual à energia dissipada por unidade de volume a cada ciclo de CA, constituindo as perdas por histerese daquele material [5].

Figura 11 – Curva de histerese. [5].



Fonte: Adaptado de [5].

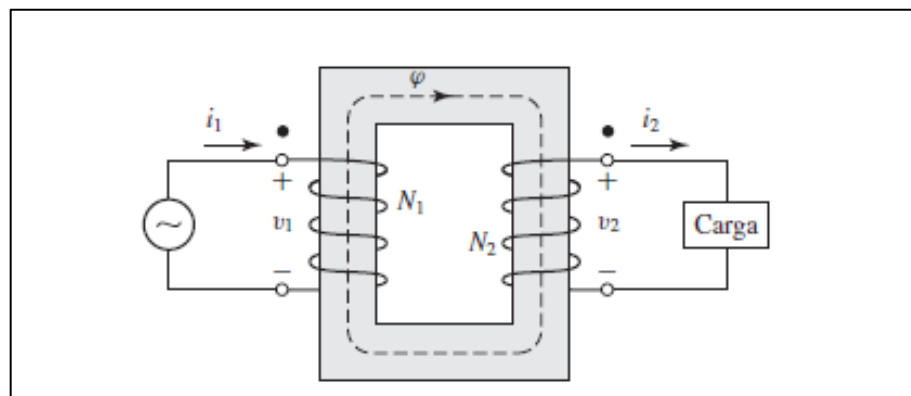
Para reduzir as perdas por histerese em equipamentos eletromagnéticos, a seleção do material do núcleo é de suma importância. O material predominante é o aço-silício, fabricado em duas categorias principais: de grão não orientado (GNO) e de grão orientado (GO) [6]. A escolha entre eles depende da aplicação e da direção do fluxo magnético. Para equipamentos estáticos, como transformadores e reatores, onde o fluxo magnético segue um caminho definido, utiliza-se o aço GO, pois seus domínios magnéticos são alinhados durante a fabricação para reduzir as perdas. Na indústria, existem diversas especificações para este material, como, por exemplo, o Aço de Grão Orientado Regular (RGO), o de Alta Permeabilidade (HGO) e o de Alta Permeabilidade com Refinamento de Domínios (HGO DR) [6]. O RGO é amplamente utilizado em transformadores, oferecendo um bom equilíbrio entre baixas perdas e alta permeabilidade. O HGO, por sua vez, proporciona uma permeabilidade ainda maior, resultando em maior eficiência. Já o HGO DR é uma evolução do HGO, submetido a

um tratamento a laser para refinar os domínios magnéticos, o que reduz ainda mais as perdas no núcleo sem comprometer a permeabilidade. Contudo, seu uso é limitado por uma restrição térmica, não devendo ser exposto a temperaturas superiores a 600°C para não perder as propriedades adquiridas com o refinamento [6].

3.3 Ensaio em Transformador

A característica de funcionamento de um transformador de potência baseia-se no acoplamento magnético entre dois ou mais enrolamentos, considerando um transformador de dois enrolamentos, denominados de enrolamentos primário e secundário, ao se aplicar uma tensão alternada ao enrolamento primário, é gerado um fluxo magnético variável no núcleo do equipamento. A maior parte desse fluxo, conhecida como fluxo mútuo, é confinada pelo núcleo e atravessa o enrolamento secundário. De acordo com a Lei de Faraday, essa variação de fluxo induz uma tensão nos terminais do secundário. A magnitude da tensão induzida é determinada pela frequência da fonte, pela intensidade do fluxo mútuo e, crucialmente, pela razão entre o número de espiras dos enrolamentos primário e secundário, o que permite a transformação da tensão de suprimento para diferentes níveis de tensão [4], a Figura 12 mostra o circuito ideal de um transformador.

Figura 12 – Circuito de um transformador ideal. [4].



Fonte: Adaptado de [4].

No modelo do transformador ideal, assume-se que todo o fluxo está confinado no núcleo e que não há perdas energéticas. Sob essas considerações, obtém-se uma relação direta entre as tensões v_1 e v_2 a partir da relação de espiras [4].

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.10)$$

Quando uma carga é conectada ao secundário, surge uma Força Magnetomotriz (FMM_2) contrária ao fluxo original. Para manter o fluxo, o primário deve gerar uma FMM_1 que compense a FMM_2 . No modelo ideal, considera-se que FMM_1 é igual a FMM_2 , o que leva à relação de correntes [4].

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (3.11)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.12)$$

A partir das relações de tensão e corrente, é possível derivar a relação de impedância.

$$Z_1 = Z_2 \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (3.13)$$

em que:

Z_1 é a impedância refletida vista pelo primário;

Z_2 é a impedância do secundário;

N_1 é o número de espiras do primário;

N_2 é o número de espiras do secundário.

Portanto, a impedância da carga no secundário é vista pelo primário como uma impedância refletida, permitindo que o circuito seja analisado como um circuito elétrico unificado [4].

Enquanto o modelo de transformador ideal é uma ferramenta teórica útil, um transformador real apresenta perdas e fenômenos que desviam seu comportamento da idealidade. Para uma análise precisa, é necessário modelar essas imperfeições, que são perdas geradas pelas bobinas e pelo material magnético [5].

Uma parcela significativa das perdas ocorre no núcleo magnético, sendo composta pelas perdas por histerese e pelas perdas por correntes parasitas. As

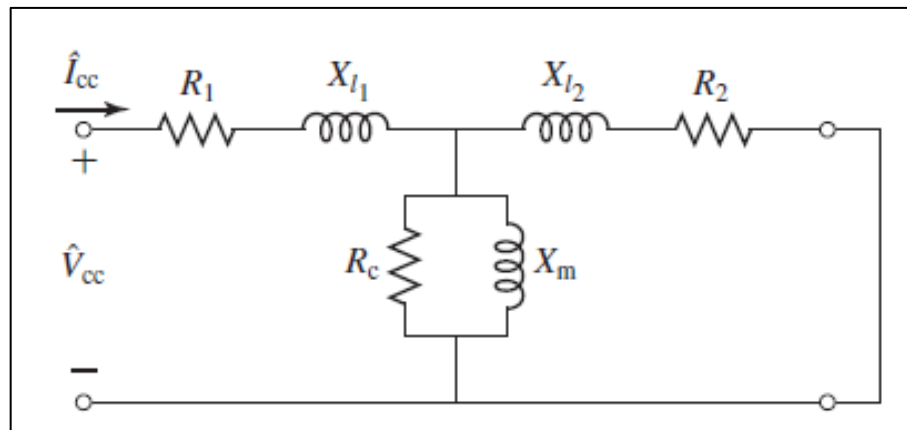
correntes parasitas, também conhecidas como correntes de Foucault, são induzidas no próprio material ferromagnético devido à variação do fluxo magnético, gerando aquecimento e dissipando energia. Para mitigar este efeito, a técnica construtiva fundamental é a laminação do núcleo, que consiste no empilhamento de chapas finas de aço-silício, eletricamente isoladas entre si. Essa construção limita a circulação das correntes parasitas, aumentando a resistência efetiva do caminho e reduzindo as perdas associadas [5].

Além das perdas no núcleo, outras não idealidades devem ser consideradas como o fluxo disperso, a corrente de excitação do núcleo e as perdas no cobre do enrolamento[5].

- Perdas no Cobre: os enrolamentos primário e secundário possuem resistência elétrica. A passagem de corrente por esses condutores gera perdas por efeito Joule, que se manifestam como calor.
- Fluxo de Dispersão: em um transformador real, parte do fluxo gerado pelo enrolamento primário não concatena o secundário, fechando seu caminho magnético pelo ar. Este fluxo, denominado fluxo de dispersão, não transfere energia e é modelado como uma reatância em série com cada enrolamento.
- Corrente de Excitação: para que o fluxo magnético seja estabelecido no núcleo, o transformador consome uma pequena corrente da fonte, mesmo sem carga. Essa corrente de excitação é necessária para magnetizar o núcleo e suprir as perdas por histerese e correntes parasitas.

A partir dessas divergências entre um transformador ideal e um real, é possível construir um circuito elétrico equivalente que modele o comportamento da máquina de maneira realista. A Figura 13 apresenta o modelo T de um transformador, onde cada componente representa um fenômeno físico específico.

Figura 13 – Circuito equivalente de um Transformador.



Fonte: Adaptado de [4].

Os elementos em série, R_1 e X_1 (primário) e R_2 e X_2 (secundário referido), modelam as características dos enrolamentos. As resistências R_1 e R_2 representam as perdas no cobre devido ao efeito Joule (I^2R) nos condutores. As reatâncias X_1 e X_2 são as reatâncias de dispersão, que representam o efeito do fluxo de dispersão, a parcela do fluxo que não concatena ambos os enrolamentos e, portanto, não transfere energia [4].

Em paralelo, o ramo de excitação, composto por R_c e X_m , modela as propriedades do núcleo magnético. A resistência R_c representa as perdas no núcleo, que são a soma das perdas por histerese e por correntes de Foucault. A reatância X_m é a reatância de magnetização, que representa a corrente necessária para estabelecer o fluxo mútuo no núcleo do transformador [4].

Uma vez que os fenômenos do transformador real são representados pelo seu circuito elétrico equivalente, torna-se necessário determinar os valores de seus componentes. Os parâmetros do modelo, como as resistências e reatâncias de dispersão dos enrolamentos e a resistência e reatância do ramo de excitação, são obtidos experimentalmente. Para isso, realizam-se dois ensaios padronizados no transformador, o ensaio de circuito aberto e o ensaio de curto-circuito [4].

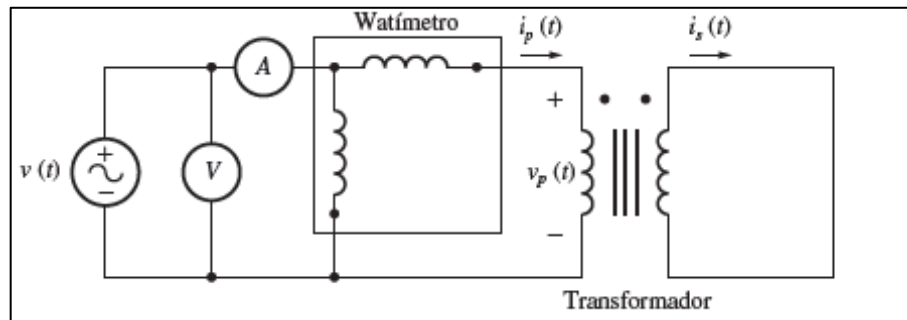
3.3.1 Ensaio de curto-circuito

O ensaio de curto-circuito tem como objetivo determinar os parâmetros da impedância em série do transformador (R_{eq} e X_{eq}), que modelam as perdas no cobre e a reatância de dispersão total dos enrolamentos.

O procedimento consiste em curto-circuitar os terminais de um dos enrolamentos, geralmente o de baixa tensão, e aplicar uma fonte de tensão alternada de frequência nominal ao outro enrolamento, geralmente o de alta tensão, conforme a Figura 14. A tensão aplicada é ajustada cuidadosamente até que a corrente nos enrolamentos atinja o seu valor nominal.

Como a impedância em série do transformador é relativamente baixa, a corrente nominal é atingida com um valor de tensão bastante reduzido, tipicamente entre 5% e 15% da tensão nominal do enrolamento alimentado. Sob essa condição de baixa tensão, a corrente que circula pelo ramo de excitação é desprezível, e a potência medida no ensaio corresponde quase que inteiramente às perdas no cobre, perdas por efeito Joule. A partir das medições de tensão, corrente e potência, é possível então calcular a resistência série equivalente e a reatância de dispersão equivalente do transformador [4].

Figura 14 – Ensaio de Curto-Circuito.



Fonte: Adaptado de [5].

A partir do ensaio de curto-circuito se obtém a tensão, a corrente e potência ativa, necessárias para calcular os parâmetros do circuito equivalente a partir das equações 3.14, 3.15, 3.16.

$$|Z_{CC}| = \frac{V_{CC}}{I_{CC}} \quad (3.14)$$

$$R_{eq} = R_{CC} = \frac{P_{CC}}{I_{CC}^2} \quad (3.15)$$

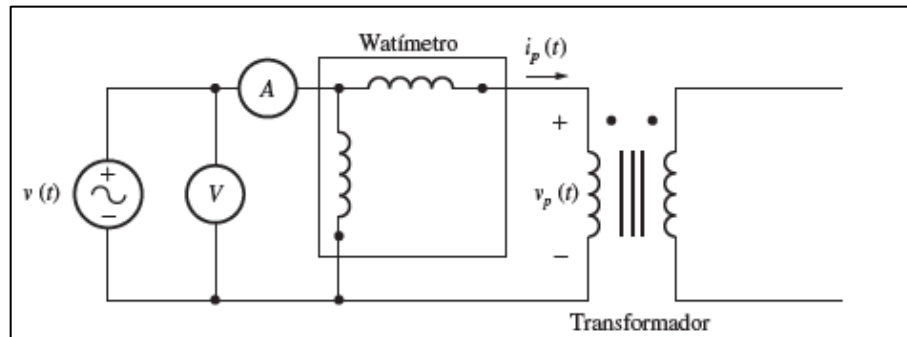
$$X_{eq} = X_{CC} = \sqrt{|Z_{CC}|^2 - R_{CC}^2} \quad (3.16)$$

3.3.2 Ensaio de circuito aberto

O ensaio de circuito aberto, também conhecido como ensaio a vazio, é realizado para determinar os parâmetros do ramo de excitação do circuito equivalente, ou seja, a resistência de perdas no núcleo (R_c) e a reatância de magnetização (X_m).

Neste ensaio, aplica-se a tensão nominal a um dos enrolamentos, enquanto os terminais do outro enrolamento são mantidos em aberto. Por conveniência e segurança, a tensão é usualmente aplicada ao enrolamento de baixa tensão. Nessas condições, a corrente que circula no enrolamento alimentado é a corrente de excitação (I_0), que possui um valor muito baixo (tipicamente de 2% a 6% da corrente nominal). Como a corrente é pequena, as perdas no cobre e a queda de tensão nos elementos série (R_1 e X_1) são desprezíveis. Assim, a potência medida corresponde essencialmente às perdas no núcleo, e a impedância calculada representa a impedância do ramo de excitação. A montagem experimental para este ensaio é apresentada na Figura 15 [5].

Figura 15 – Ensaio de Circuito Aberto.



Fonte: Adaptado de [5].

Após o ensaio são aplicadas as equações 3.17, 3.18 e 3.19 para calcular os valores de resistência e reatância do núcleo.

$$|Z_{CA}| = \frac{V_{CA}}{I_{CA}} \quad (3.17)$$

$$R_c = \frac{V_{CA}^2}{P_{CA}} \quad (3.18)$$

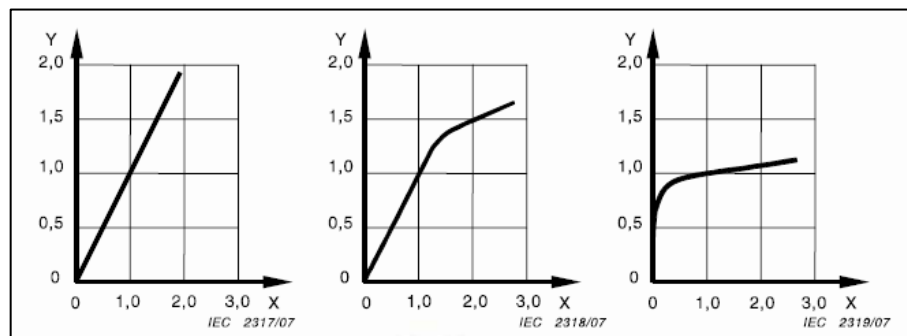
$$X_m = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{|Z_{CA}|}\right)^2 - \left(\frac{1}{R_C}\right)^2}} \quad (3.19)$$

3.4 Reator saturado

Em sistemas de potência, diversos desafios como controle de tensão em regime permanente e limitação de sobretensões temporárias exigem soluções que vão além dos componentes lineares tradicionais. O reator de saturação natural (RSN) surge como uma alternativa robusta e eficaz para algumas dessas aplicações, explorando a não linearidade intrínseca dos materiais ferromagnéticos que compõem seu núcleo.

Diferentemente de um reator linear ou de um transformador, que operando em sua faixa nominal trabalha na região linear do núcleo, o RNS é projetado para operar na região de saturação de sua curva de magnetização. Sob essa condição, sua impedância varia significativamente com a tensão aplicada, tendo alta impedância para tensões abaixo do joelho de saturação e baixa impedância para tensões acima dele. Essa mudança abrupta de característica permite ao RNS controle automático do nível de tensão. A curva característica que diferencia um reator linear (ideal) não linear que opera na região linear e um reator saturado é mostrado na Figura 16 [7].

Figura 16 – reator linear, não linear e saturado.



Fonte: Adaptado de [7].

Para analisar o impacto e o desempenho do RNS em sistemas elétricos, especialmente durante fenômenos transitórios, é indispensável um modelo matemático preciso que capture sua natureza não linear [1]. A complexidade do

comportamento magnético sob saturação torna a caracterização experimental essencial. Ensaio de laboratório são, portanto, fundamentais para levantar a curva V-I (ou Fluxo-Corrente) e determinar os parâmetros do modelo para que os dados possam ser medidos e não apenas calculados teoricamente.

4 DESENVOLVIMENTO

O objetivo deste capítulo é apresentar o desenvolvimento do trabalho, detalhando o progresso alcançado, as dificuldades encontradas e as soluções implementadas.

A modelagem do reator em ATP será baseada na representação de cada núcleo como um transformador de múltiplos enrolamentos, adaptando as configurações de 2 e 3 enrolamentos conforme a estrutura do protótipo. Esta abordagem visa não apenas validar a acurácia do modelo computacional, mas também fortalecer a compreensão do desempenho transitório do RSN, contribuindo diretamente para a sua futura aplicação e planejamento em sistemas de potência reais.

A metodologia adotada para este fim compreende a realização de ensaios laboratoriais no protótipo do reator, o cálculo de seus parâmetros elétricos a partir destes ensaios, a implementação do modelo no programa computacional ATP e a subsequente simulação de seu comportamento.

4.1 Laboratório

Para executar a modelagem proposta, a primeira etapa consistiu no levantamento dos parâmetros elétricos do reator por meio de ensaios laboratoriais. O protótipo analisado é composto por 9 colunas, sendo 6 colunas com 3 enrolamentos e 3 colunas com 2 enrolamentos.

Para a determinação da resistência dos enrolamentos e da reatância de dispersão, os procedimentos de ensaio foram baseados na norma ABNT NBR 5356 [9], adaptada para a geometria do reator. Também foi levantada a curva de magnetização para as colunas com 2 enrolamentos e com 3 enrolamentos.

Os ensaios realizados foram:

- **Medição da Resistência dos Enrolamentos:** determinada pela aplicação de corrente contínua (CC) aos terminais de cada bobina.
- **Medição da Reatância de Dispersão:** obtida por meio do ensaio de curto-circuito.
- **Levantamento da Curva de Magnetização:** ensaio para caracterizar a relação não linear entre fluxo e corrente (Curva V-I) do núcleo.

4.1.1 Ensaio de resistência em corrente contínua

Para a medição de resistência em corrente contínua, a norma diz que deve ser medida a resistência e a temperatura do enrolamento ao mesmo tempo, para que seja aplicado a correção do fator de temperatura para a temperatura padrão de operação.

Para a realização do ensaio foram utilizados os equipamentos:

- Varivolt (25 A);
- Ponte Retificadora CA-CC;
- Capacitor;
- Multímetro Minipa ET-2233;
- Multímetro Fluke 87V.

As imagens dos equipamentos usados na medição de resistência indireta em corrente contínua estão da Figura 17 a Figura 23.

Figura 17 – Varivolt (25 A).



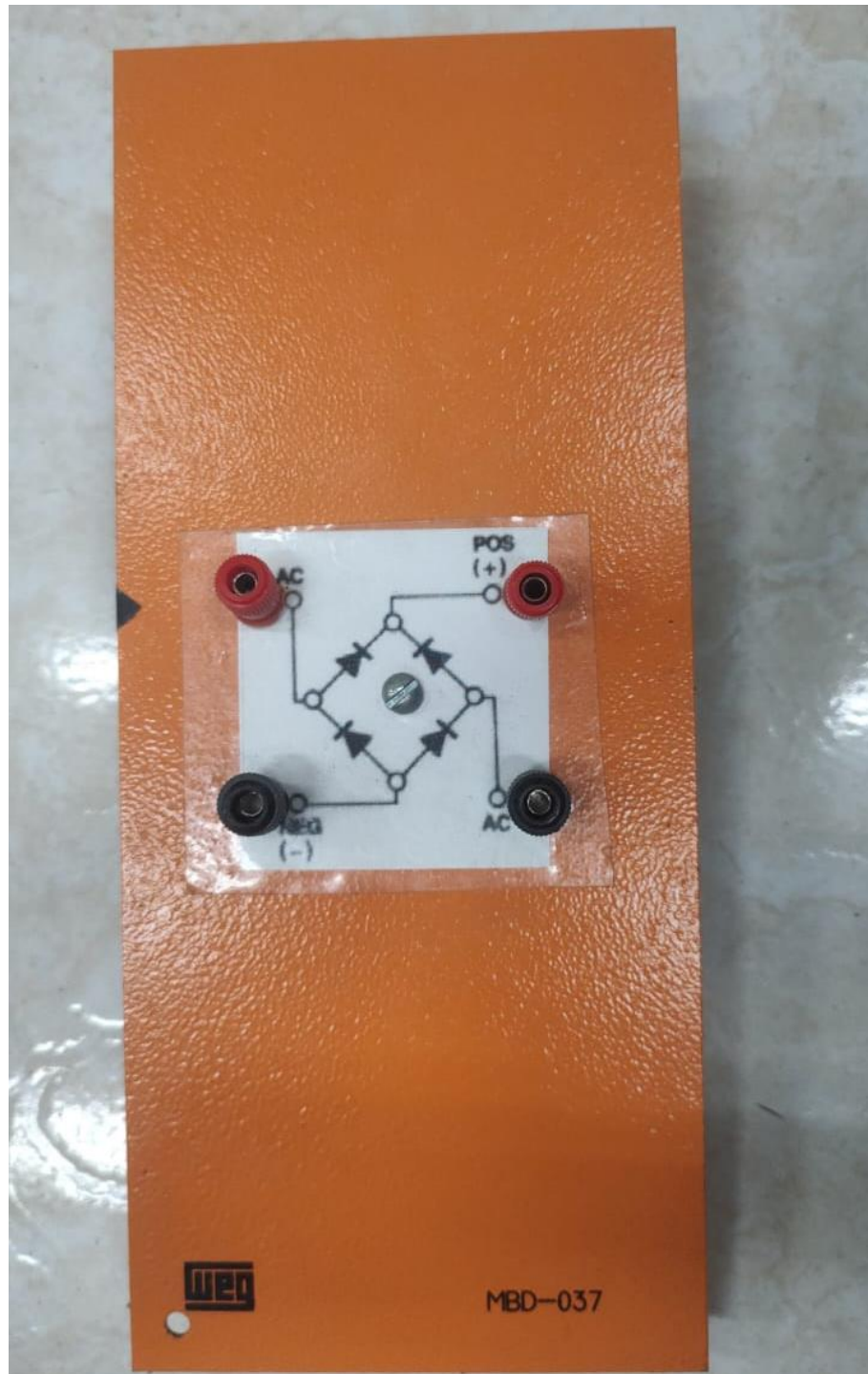
Fonte: Autor.

Figura 18 – Placa Varivolt (25A).



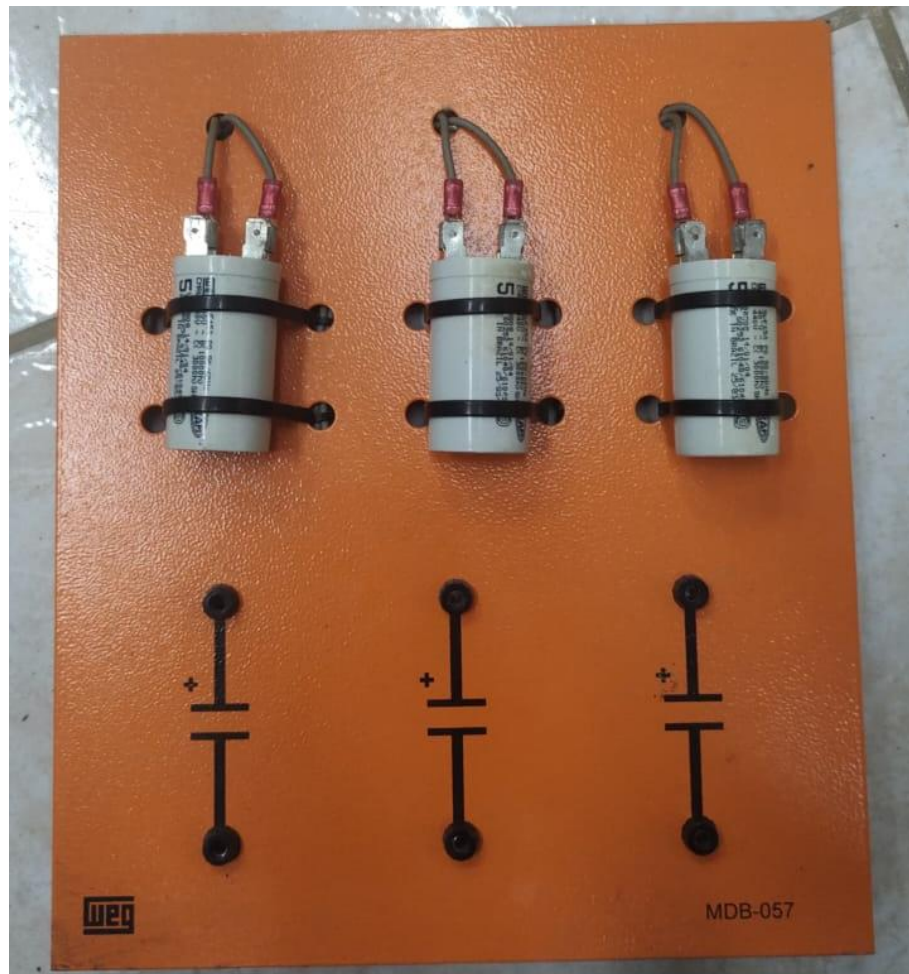
Fonte: Autor.

Figura 19 – Ponte retificadora.



Fonte: Autor.

Figura 20 – Capacitor.



Fonte: Autor.

Figura 21 – Multímetro Minipa ET-2233.



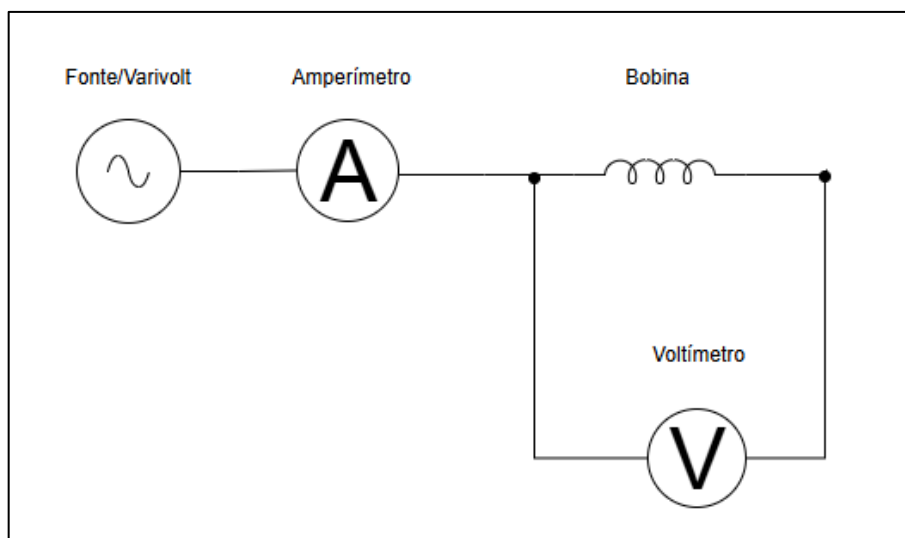
Fonte: Autor.

Figura 22 – Multímetro Fluke 87V.



Fonte: Autor.

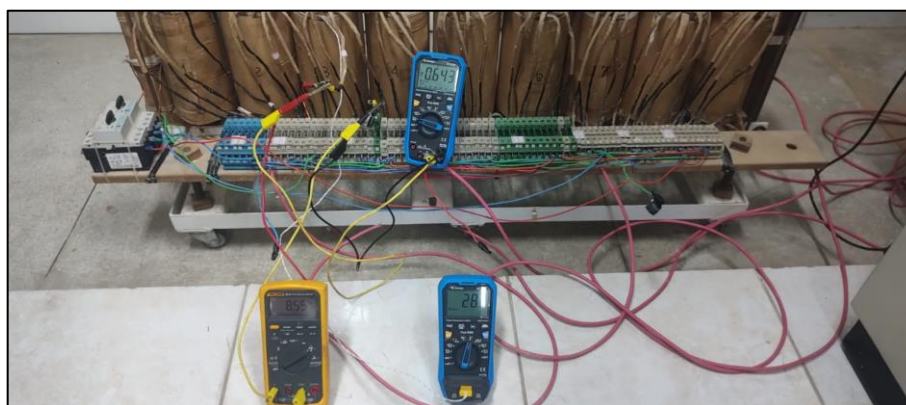
Figura 23 – Diagrama elétrico medição de resistência em corrente contínua.



Fonte: Autor.

Para a realização do ensaio, uma fonte de tensão CA variável (Varivolt) alimentou a entrada de uma ponte retificadora. Na saída CC da ponte, foi instalado um capacitor de filtragem em paralelo. O circuito de carga foi configurado conectando-se o multímetro Fluke (atuando como amperímetro) em série com a bobina, entre o terminal positivo da ponte e a própria bobina. O multímetro Minipa (atuando como voltímetro) foi instalado em paralelo com os terminais da bobina, permitindo a medição simultânea da corrente que atravessa a carga e da tensão aplicada sobre a carga, juntamente com outro multímetro Minipa configurado como termopar conectado a bobina para medir a temperatura. A imagem do ensaio realizado está na Figura 24.

Figura 24 – Medição de resistência em corrente contínua.



Fonte: Autor.

Os valores de resistência em corrente contínua já foram levantados anteriormente por Villa Verde em [3] a Tabela 1 traz esses valores para comparação com a resistência obtida pelo ensaio na Tabela 3.

Tabela 1 – Valores de Resistencia medidos por Villa Verde [3].

Bobina	R (Ω) [3]	Temperatura (C°)
N0	0,177	21,8
N1	0,099	21,9
N2	0,068	21,9
N3	0,089	21,7

Fonte: Adaptado de [3].

Os valores obtidos no ensaio encontram-se na Tabela 2 e as resistências obtidas para este ensaio encontram-se na Tabela 3.

Tabela 2 – ensaio de Resistencia em Corrente continua.

Bobinas	Número de espiras	Tensão (V)	Corrente (A)	Temperatura(c°)
N0	144	1,8	9,4	26
N1	107	1,039	9,72	27
N2	57	0,644	8,38	28,3
N3	72	1,02	9,8	27,2

Fonte: Autor.

Tabela 3 – Valores de Resistencia calculado a partir do ensaio em Corrente Continua.

Bobinas	Número de espira	R (Ω)
N0	144	0,191
N1	107	0,107
N2	57	0,077
N3	72	0,104

Fonte: Autor.

Comparando os valores obtidos por Villa Verde em [3] e comparando com os valores obtidos no ensaio, vemos que os valores estão próximos e o erro entre eles pode ser justificado pela temperatura de medição e o equipamento usado. De acordo com o trabalho de Villa Verde [3] foi utilizado uma microhmímetro, já os valores da Tabela 3 foram encontrados a partir de cálculo pela tensão e corrente medida.

4.1.2 Ensaio de Curto-Circuito

Na realização da medição de impedância de Curto-Circuito, conforme [9], o ensaio deve ser realizado na frequência fundamental, aplicando uma tensão senoidal aos terminais de um enrolamento, mantendo os terminais do outro enrolamento curto-circuitado, e no caso de 3 ou mais enrolamentos, esses devem estar em circuito aberto. A tensão a ser aplicada será a tensão de curto-circuito e a corrente de alimentação deve ser pelo menos 50% da corrente nominal.

Para realizar os ensaios foram utilizados os equipamentos:

- Varivolt (50 A);
- Qualimetro Fluke 435 series II.

O ensaio de curto-circuito consistiu em alimentar o enrolamento primário (Bobina 1) com uma fonte de tensão CA variável (Variac), mantendo os terminais do enrolamento secundário (Bobina 2) curto-circuitados. Para a aquisição dos dados de entrada, foi utilizado um analisador de qualidade de energia (Qualimetro), cujas garras de tensão foram conectadas em paralelo com a Bobina 1. Simultaneamente, a garra de corrente (alicate amperímetro) foi acoplada a um dos condutores de alimentação da Bobina 1 para medir a corrente de entrada. As imagens dos equipamentos usados para a realização do ensaio de Curto-Circuito juntamente com a imagem da medição encontram-se da Figura 25 a Figura 32.

Figura 25 – Variolt (50 A).



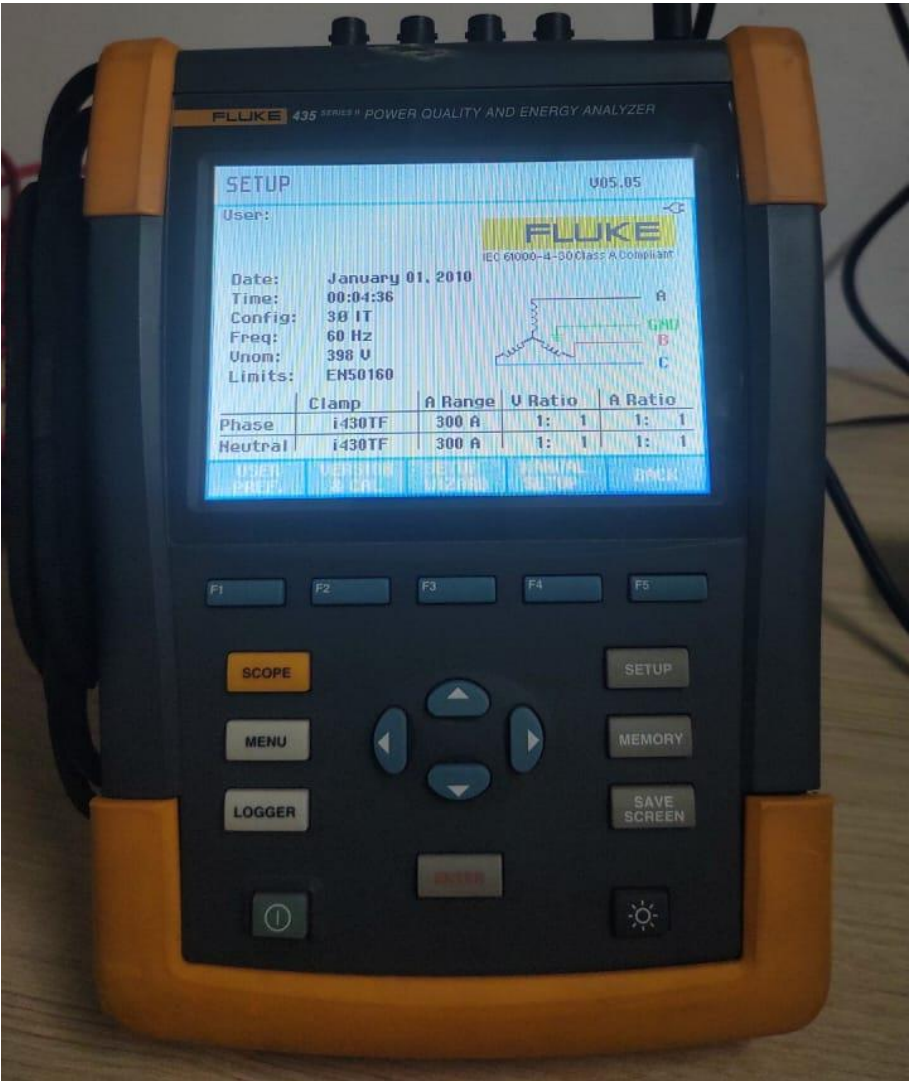
Fonte: Autor.

Figura 26 – Placa Varivolt (50A).



Fonte: Autor

Figura 27 – Qualimetro Fluke 435 series II.



Fonte: Autor.

Figura 28 – Garra de tensão do Qualimetro Fluke CAT III 1000V.



Fonte: Autor.

Figura 29 – Garra de corrente I5S de 10A do Qualimetro Fluke.



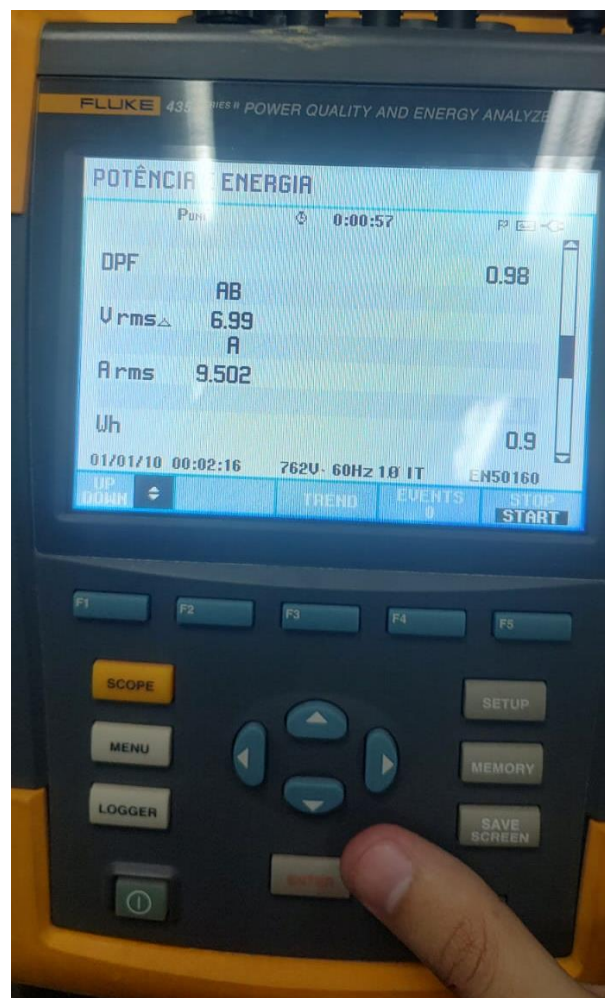
Fonte: Autor.

Figura 30 – Garra de corrente I430-FLEXI-TF-II de 300A do Qualimetro Fluke.



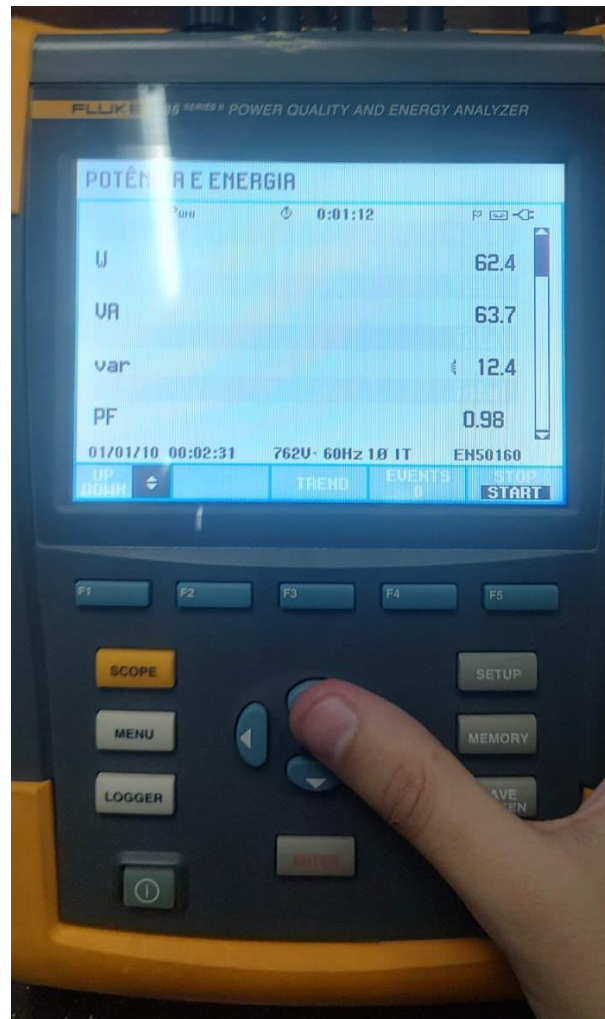
Fonte: Autor.

Figura 31 – Valor de tensão e corrente do ensaio na Bobina N0 coluna I.



Fonte: Autor.

Figura 32 –Valor das potências do ensaio na Bobina N0 coluna I.



Fonte: Autor.

Além das Equações (3.14) a (3.16) para calcular os valores de R_1 e R_2 , X_1 e X_2 foram utilizadas as Equações (4.1) a (4.4) quando a seção dos enrolamentos for a mesma para os ensaios nas colunas de 2 enrolamentos.

$$R_1 = \frac{R_{eq}}{(1 + \frac{N_1}{N_2})} \quad (4.1)$$

$$R_2 = \frac{R_{eq}}{(\frac{N_1}{N_2})(1 + \frac{N_1}{N_2})} \quad (4.2)$$

$$X_1 = \frac{X_{eq}}{(1 + \frac{N_1}{N_2})} \quad (4.3)$$

$$X_2 = \frac{X_{eq}}{(\frac{N_1}{N_2})(1 + \frac{N_1}{N_2})} \quad (4.4)$$

Para as colunas de 3 enrolamentos foram usadas as Equações (4.5) a (4.10) abaixo.

$$R_1 = \frac{1}{2}(R_{12} + R_{13} - R_{23}) \quad (4.5)$$

$$R_2 = \frac{1}{2}(R_{12} + R_{23} - R_{13}) \quad (4.6)$$

$$R_3 = \frac{1}{2}(R_{23} + R_{13} - R_{12}) \quad (4.7)$$

$$X_1 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{13} - X_{23}) \quad (4.8)$$

$$X_2 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{23} - X_{13}) \quad (4.9)$$

$$X_3 = \frac{1}{2}(X_{23} + X_{13} - X_{12}) \quad (4.10)$$

Os valores obtidos no ensaio encontram-se na

Tabela **4** especificando conjunto de bobinas, coluna, e número de espiras.

Tabela 4 – Valores de resistência e reatância de dispersão obtidas nos ensaios de Curto-circuito.

ensaio CC em coluna com 2 enrolamento							
Coluna	conjunto sobre ensaio	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa (W)	Bobina	R (Ω)	XL (Ω)
I	N0*-N3	6,84	9,343	62,4	N0	0,238	0,053
					N3	0,119	0,026
IV	N0*-N3	6,99	9,502	62,1	N0	0,229	0,087
					N3	0,115	0,043
ensaio CC em coluna com 3 enrolamento							
Coluna	conjunto sobre ensaio	Tensão (V)	Corrente (A)	Potência Ativa (W)	Bobina	R (Ω)	XL (Ω)
II	N1*-N2	5,56	9,808	54,4	N1	0,1440	-0,0224
	N1*-N3	3,71	9,288	34	N2	0,4214	0,0619
	N2*-N3	1,8	9,22	16,2	N3	0,2500	0,0874
V	N1*-N2	4,98	9,207	45,4	N1	0,1707	-0,0188
	N1*-N3	4,05	9,252	37,1	N2	0,3648	0,0944
	N2*-N3	1,73	9,36	15,6	N3	0,2626	0,0802
* Bobina onde foi medido os valores de tensão, corrente e potência.							

4.1.3 Curva VxI

Após a determinação dos parâmetros de resistência e reatância de dispersão, a etapa subsequente e fundamental é o levantamento da característica de magnetização (Curva V x I) do reator. Estas curvas descrevem o comportamento do núcleo ferromagnético e são um requisito essencial para a parametrização dos modelos de simulação no programa computacional ATP.

O ensaio, análogo ao de circuito aberto em transformadores, consiste em aplicar uma tensão CA variável em um dos enrolamentos, mantendo os demais em aberto, enquanto se mede a tensão aplicada e a corrente de excitação resultante. A tensão é proporcional ao fluxo magnético no núcleo, e a corrente é proporcional à força magnetomotriz, permitindo assim a construção da curva $\phi \times I$ (ou V x I) do caminho magnético.

4.1.3.1 Ensaio monofásico por coluna

A estratégia de ensaio foi definida pela arquitetura física do reator e pelos requisitos do modelo ATP. O equipamento é composto por dois tipos de colunas:

- Colunas com dois enrolamentos (tipo N0 e N3).
- Colunas com três enrolamentos (tipo N1, N2 e N3).

Para a correta parametrização do modelo de transformador equivalente no ATP, é essencial caracterizar a curva de magnetização de cada tipo de coluna principal. Portanto, o levantamento focou primariamente na obtenção das curvas $V \times I$ dos enrolamentos N0 (representante das colunas de dois enrolamentos) e N1 (representante das colunas de três enrolamentos).

Adicionalmente, para validar a simetria construtiva do equipamento e a consistência do modelo, foram realizados ensaios complementares. As curvas $V \times I$ dos enrolamentos N0 e N1 foram levantadas em duas colunas distintas (para verificar a repetibilidade), e as características dos enrolamentos N2 e N3 também foram aferidas.

Conforme pode ser visto na Figura 7 a posição das Bobinas N0 e N1 são basicamente a mesma, devido a isso será feita também uma análise comparativa das curvas referenciando apenas pelo número de espiras.

A análise subsequente apresentará:

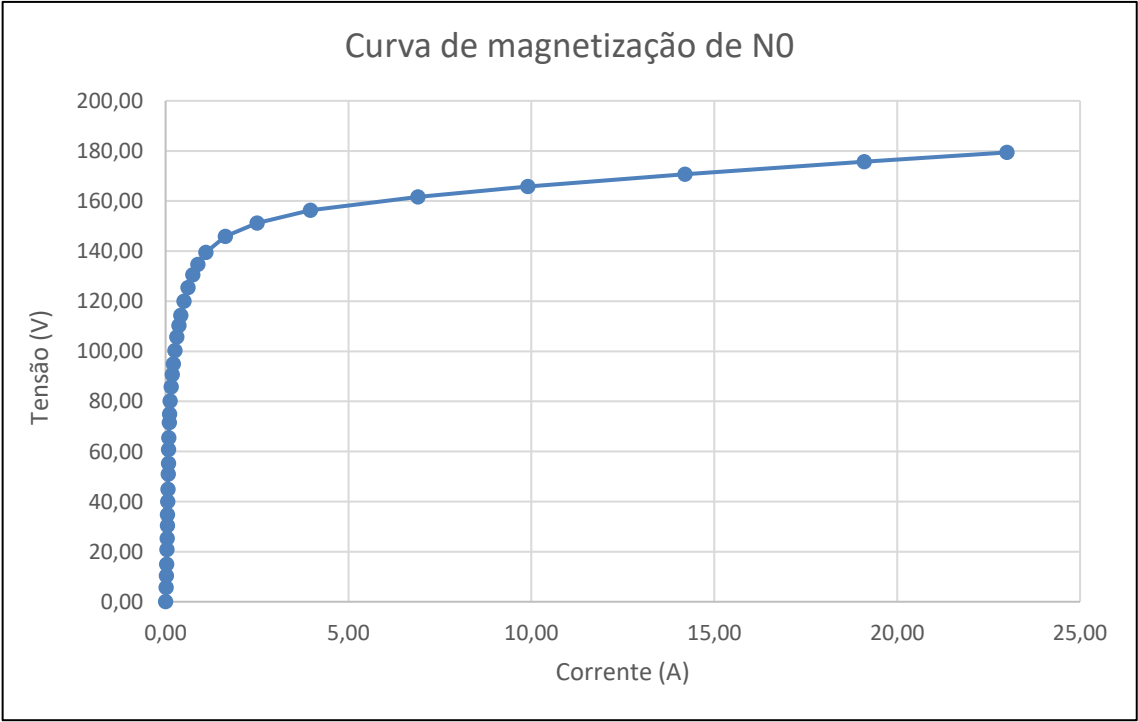
- As curvas de saturação individuais para cada enrolamento (N0, N1, N2 e N3).
- Gráficos comparativos validando a similaridade entre as duas curvas N0 e as duas curvas N1 obtidas.
- Uma sobreposição das curvas N0 e N1, com a curva N0 referenciada à base de espiras de N1, para análise comparativa direta das características magnéticas.

Os equipamentos utilizados foram:

- Varivolt (50 A);
- Qualimetro Fluke 435 series II.

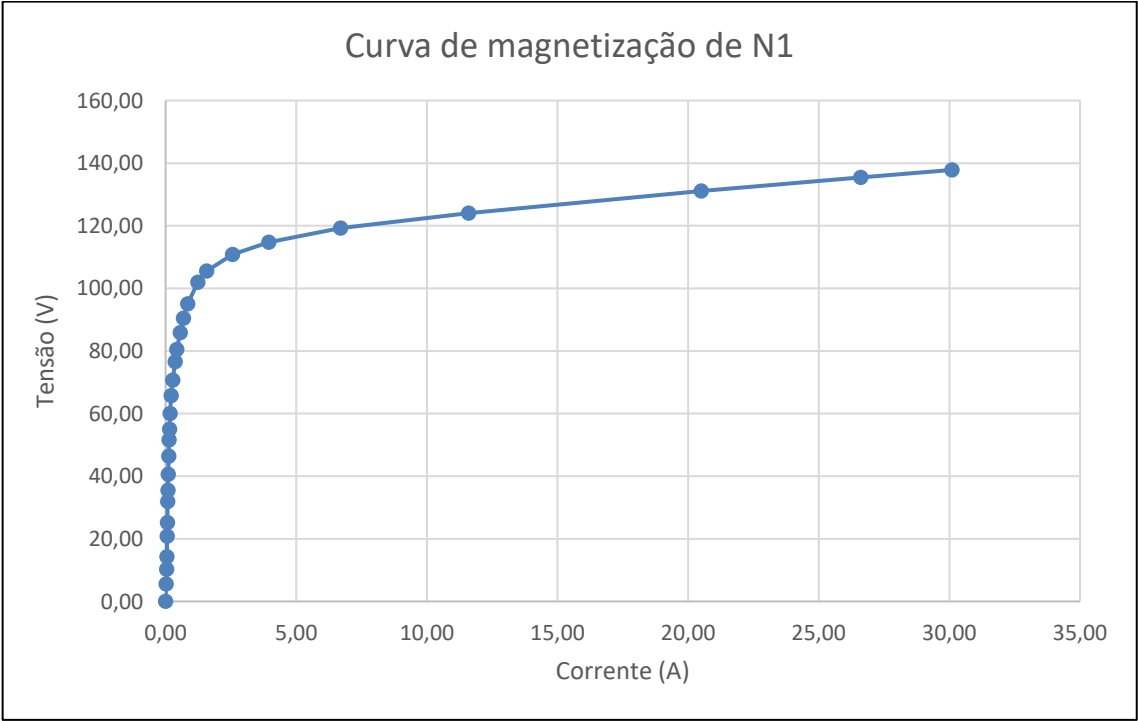
As curvas de magnetização estão da Figura 33 a Figura 39.

Figura 33 –Curva de magnetização bobina N0.



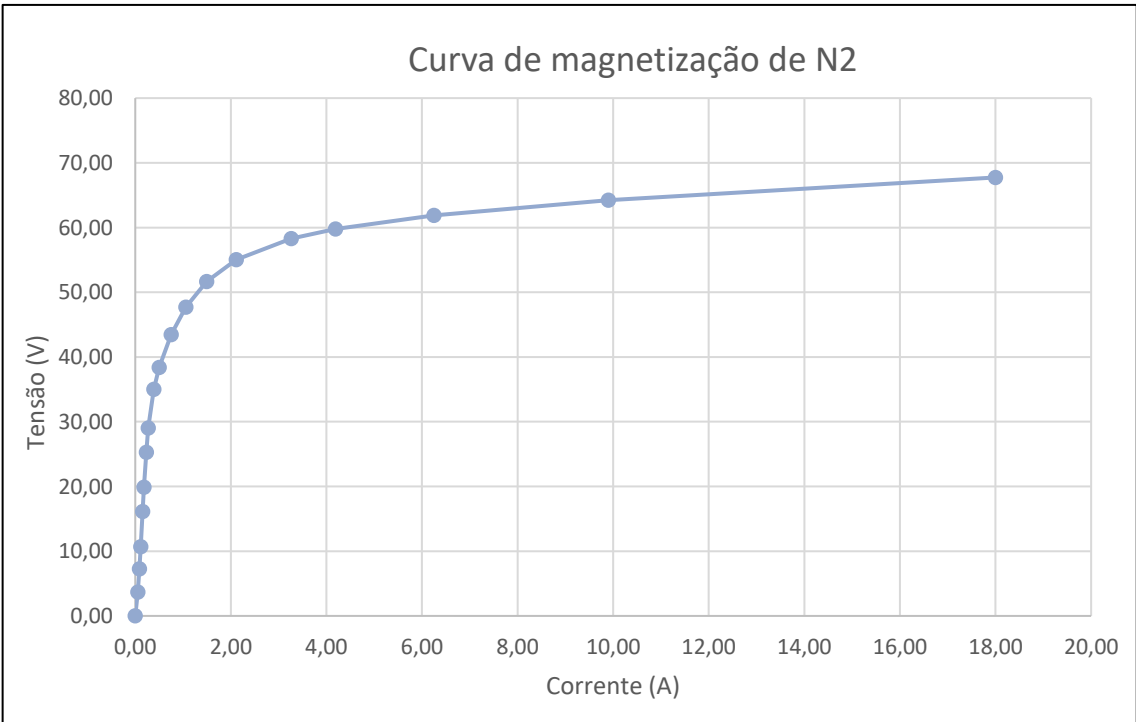
Fonte: Autor.

Figura 34 – Curva de magnetização bobina N1.



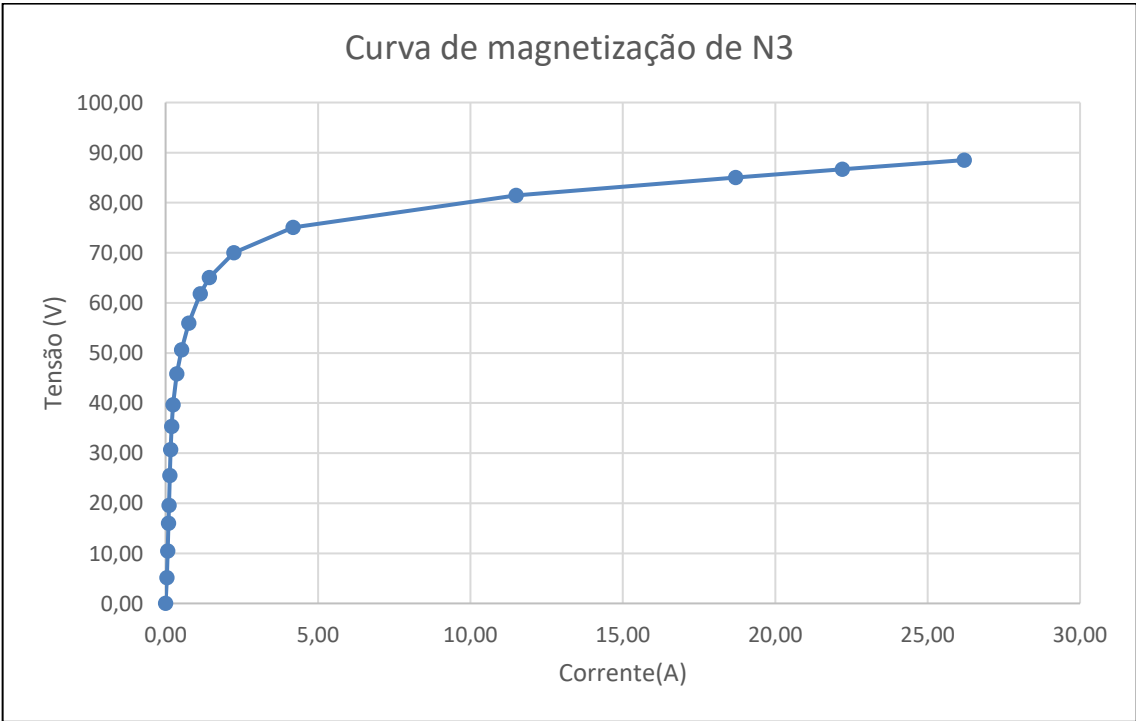
Fonte: Autor.

Figura 35 – Curva de magnetização bobina N2.



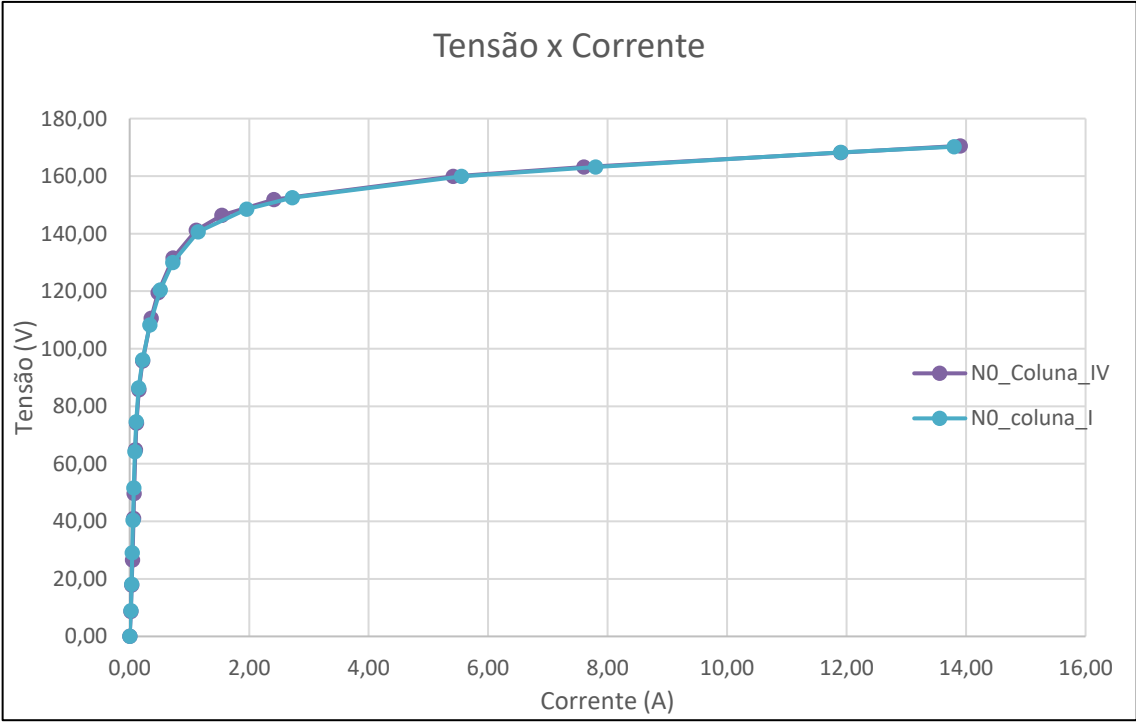
Fonte: Autor.

Figura 36 – Curva de magnetização bobina N3.



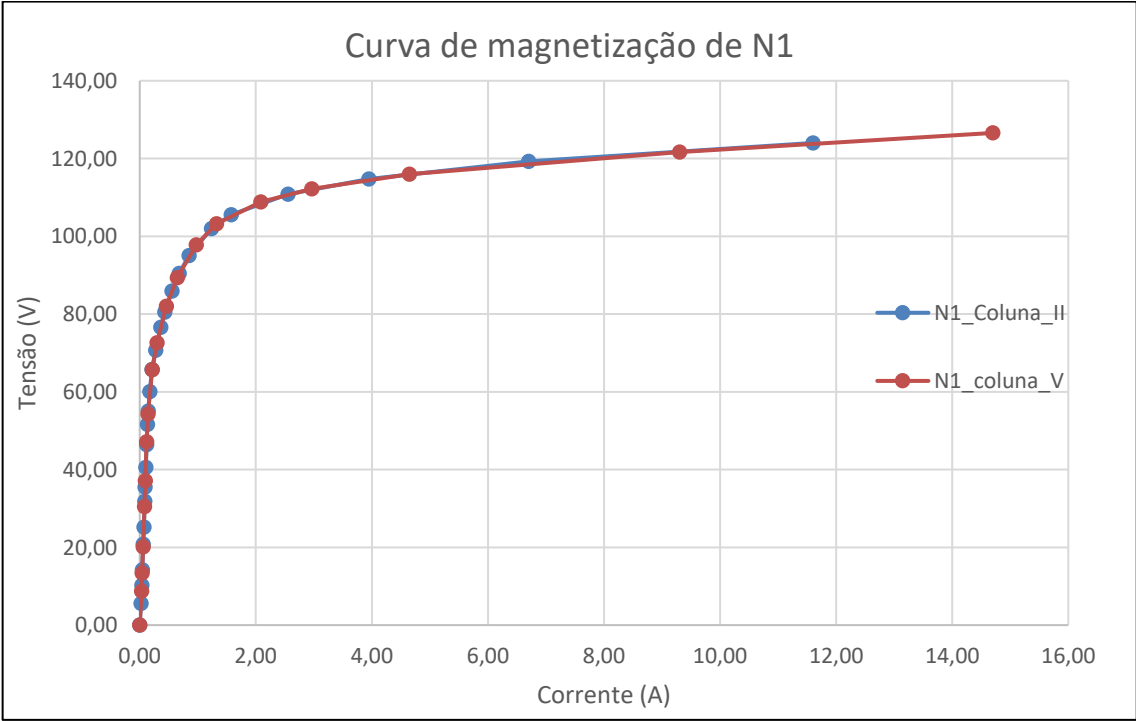
Fonte: Autor.

Figura 37 – Curva de magnetização bobina N0 para coluna I e coluna IV.



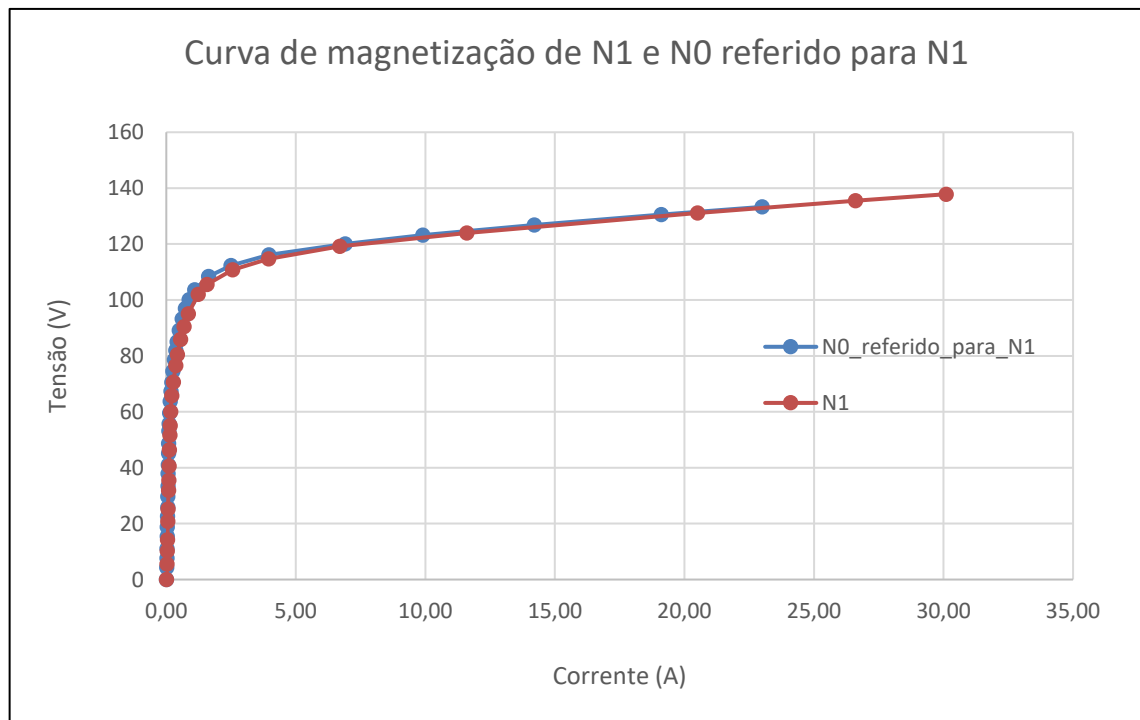
Fonte: Autor.

Figura 38 – Curva de magnetização bobina N1 para coluna II e coluna V.



Fonte: Autor.

Figura 39 – Curva de magnetização bobina N1 e N0 referenciada para N1.



Fonte: Autor.

4.1.3.2 Ensaio no equipamento trifásico

Para que o modelo construído no ATP possa ser validado em comparação com o equipamento real, foi necessário levantar experimentalmente a curva de magnetização completa do reator Siemens. Ressalta-se que todos os valores de tensão e corrente medidos neste ensaio foram valores de Linha.

Os equipamentos utilizados para o levantamento da curva de magnetização foram:

- Varivolt(50A);
- Qualimetro Fluke 435 series II;
- Transformador a seco;
- Cubículo de medição.

O Varivolt e o Qualimetro foram apresentados anteriormente. O transformador a seco foi utilizado como fonte de tensão elevada, e o cubículo de medição foi

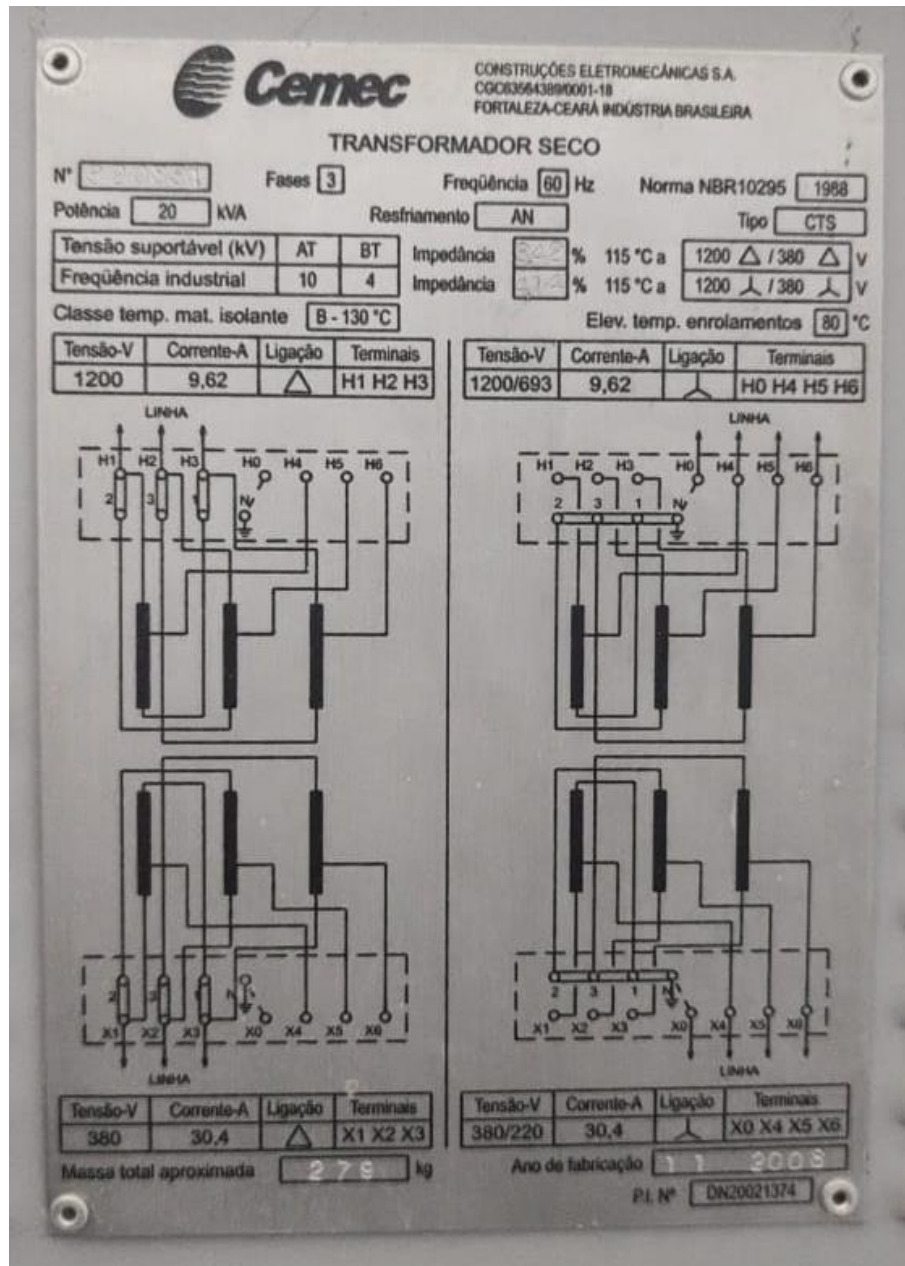
empregado para a interface segura e medição dos parâmetros de alta tensão. As imagens do transformador, da sua placa de identificação e do cubículo encontram-se nas Figura 40 a Figura 42.

Figura 40 – Transformador a seco.



Fonte: Autor.

Figura 41 –Placa do Transformador.



Fonte: Autor.

Figura 42 – Cubículo de medição.



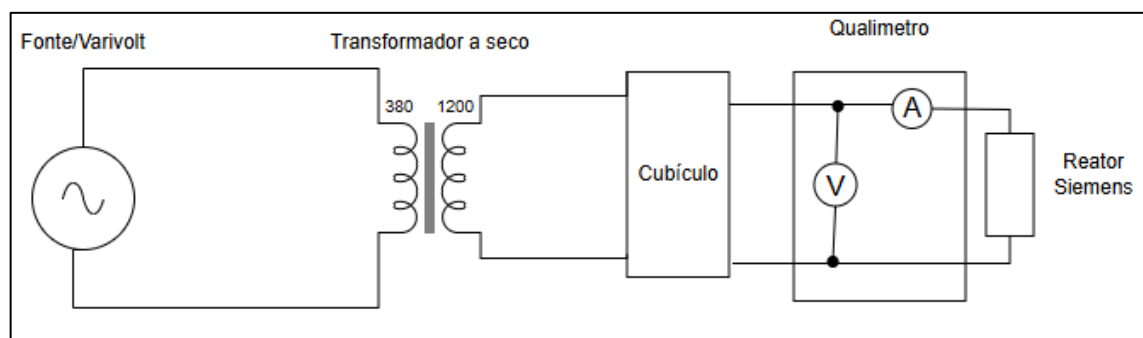
Fonte: Autor.

Figura 43 – Cubículo de medição aberto.



Fonte: Autor.

Figura 44 – Diagrama elétrico do Circuito montado.



Fonte: Autor.

A montagem do circuito de ensaio, cujo diagrama elétrico é apresentado na Figura 44, consistiu em interligar a saída do Varivolt à entrada de baixa tensão do transformador a seco. A saída de alta tensão do transformador foi conectada à entrada do cubículo de medição, e a saída deste foi interligada aos terminais de entrada do reator.

Com o circuito assim configurado, iniciou-se o levantamento da curva. A tensão de alimentação foi elevada gradualmente, em incrementos (passos) de aproximadamente 50 V, enquanto a corrente de excitação resultante era registrada pelo Qualimetro. A Tabela 5 compila os valores de tensão e corrente medidos, e a Figura 45 apresenta a curva de magnetização característica resultante para o reator Siemens.

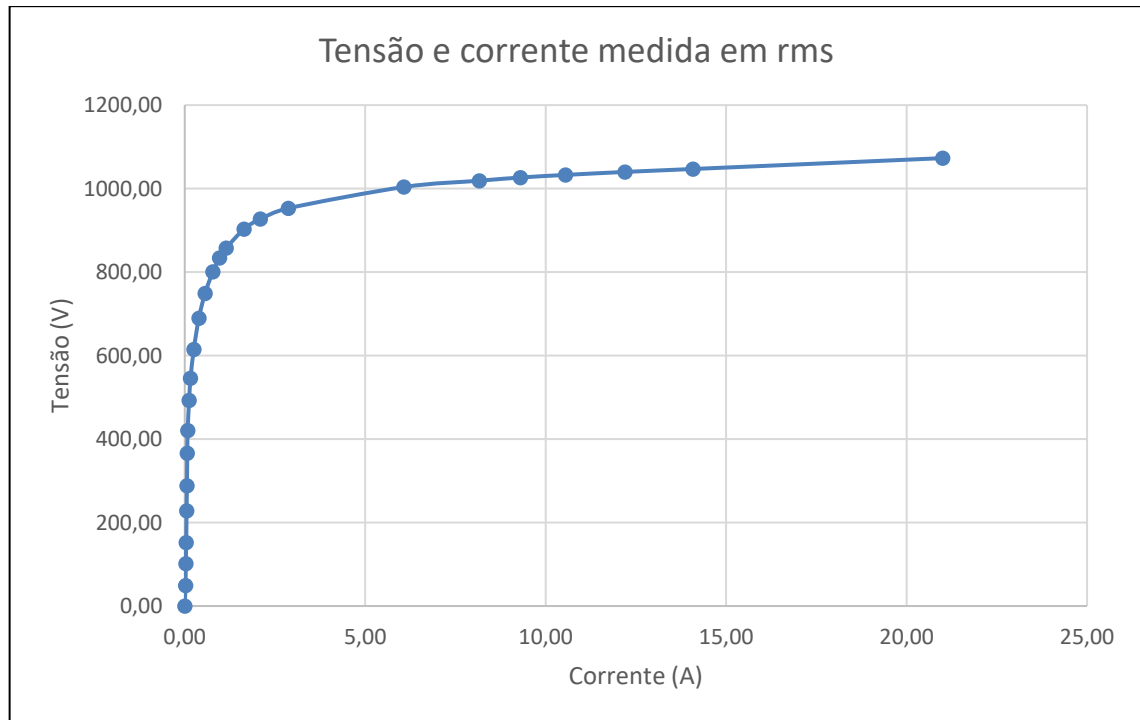
Tabela 5 –Valores medido do Reator Siemens.

Tensão rms [V]	Corrente rms[A]
0,00	0,00
49,43	0,02
101,84	0,03
151,78	0,04
228,11	0,05
288,40	0,06
366,39	0,07
420,70	0,08
492,46	0,12
546,04	0,16
614,80	0,25
689,44	0,39
748,68	0,56
801,00	0,78
834,13	0,96
857,77	1,15
902,84	1,64
927,10	2,09
952,98	2,87
1003,90	6,07
1018,90	8,16
1026,60	9,30
1032,80	10,55
1040,00	12,20
1047,00	14,08

Tensão rms [V]	Corrente rms[A]
1073,00	21,00

Fonte: Autor.

Figura 45 –Curva de magnetização Reator Siemens.



Fonte: Autor.

4.2 Simulação

Após a coleta e tratamento dos dados experimentais (detalhados na Seção 4.1), iniciou-se a etapa de simulação. O objetivo desta seção é modelar o reator Siemens no programa computacional ATP, simular seu comportamento e validar o modelo construído comparando-o com os resultados reais dos ensaios.

Para isso, esta seção está estruturada em três subseções:

- **4.2.1 - Modelagem do Reator no ATP:** esta subseção detalha a construção do modelo computacional. Serão apresentados os parâmetros provenientes dos ensaios (como resistências e reatâncias) e a curva de magnetização (V x I) que foram inseridos no programa computacional, juntamente com as imagens do modelo finalizado no ATP.

- **4.2.2 - Ferramenta de Automação de Simulação:** aqui será apresentado um programa computacional desenvolvido pelo autor. Esta ferramenta foi criada para otimizar o fluxo de trabalho, automatizando a geração de casos, a execução das simulações e a coleta de dados resultantes, facilitando a análise comparativa.
- **4.2.3 - Comparação e Validação dos Resultados:** esta subseção final realiza a validação do modelo. Será feita uma comparação direta entre as curvas de magnetização simuladas (obtidas no ATP) e as curvas levantadas experimentalmente (apresentadas na Seção 4.1), analisando a acurácia e as limitações do modelo desenvolvido.

4.2.1 Modelagem computacional no ATP

A modelagem do reator foi realizada no programa computacional ATPDraw, utilizando-se de modelos de transformadores monofásicos para representar as colunas do equipamento. Os dados de entrada essenciais para a parametrização destes modelos são:

- Resistência ôhmica (R) de cada enrolamento;
- Reatância de dispersão (X) de cada enrolamento;
- A relação de transformação (quando aplicável);
- A curva de magnetização (Fluxo x Corrente).

Os valores de resistência e reatância de dispersão, obtidos nos ensaios e adotados para o modelo, encontram-se compilados na Tabela 6.

Os dados da curva de magnetização, utilizados na rotina **SATURATION** do ATP para gerar a característica Fluxo-Corrente, estão apresentados na Tabela 7 para a bobina N0 e na Tabela 8 para a bobina N1. Todos os "cartões" de entrada detalhados, com os valores em por unidade (PU) e as bases de cálculo utilizadas, estão disponíveis no APÊNDICE A.

Tabela 6 –Valores utilizados de resistência e reatância utilizado para o caso base.

Bobina	R(ohm)	X(ohm)
N0	0,234	0,070
N1	0,179	0,022
N2	0,102	0,018
N3	0,120	0,028

Fonte: Autor.

Tabela 7 –Valores de Fluxo-corrente da bobina N0.

Fluxo (volt-seg)	Corrente(A)
0,0215	0,0184
0,0387	0,0265
0,0561	0,0369
0,0782	0,0448
0,0951	0,0548
0,1141	0,0617
0,1305	0,0688
0,1501	0,0772
0,1684	0,0865
0,1912	0,0954
0,2072	0,1030
0,2280	0,1140
0,2457	0,1270
0,2684	0,1479
0,2812	0,1659
0,3007	0,2045
0,3219	0,2539
0,3402	0,3153
0,3562	0,3810
0,3763	0,4628
0,3968	0,5784
0,4137	0,6743
0,4291	0,7852
0,4500	0,9598
0,4706	1,1919
0,4895	1,4696
0,5052	1,8121
0,5233	2,3232
0,5473	3,7385
0,5671	6,1886
0,5862	10,0715
0,6062	18,3321
0,6220	25,3295
0,6404	35,3776

Fluxo (volt-seg)	Corrente(A)
0,6592	45,4721
0,6730	53,5418

Fonte: Autor.

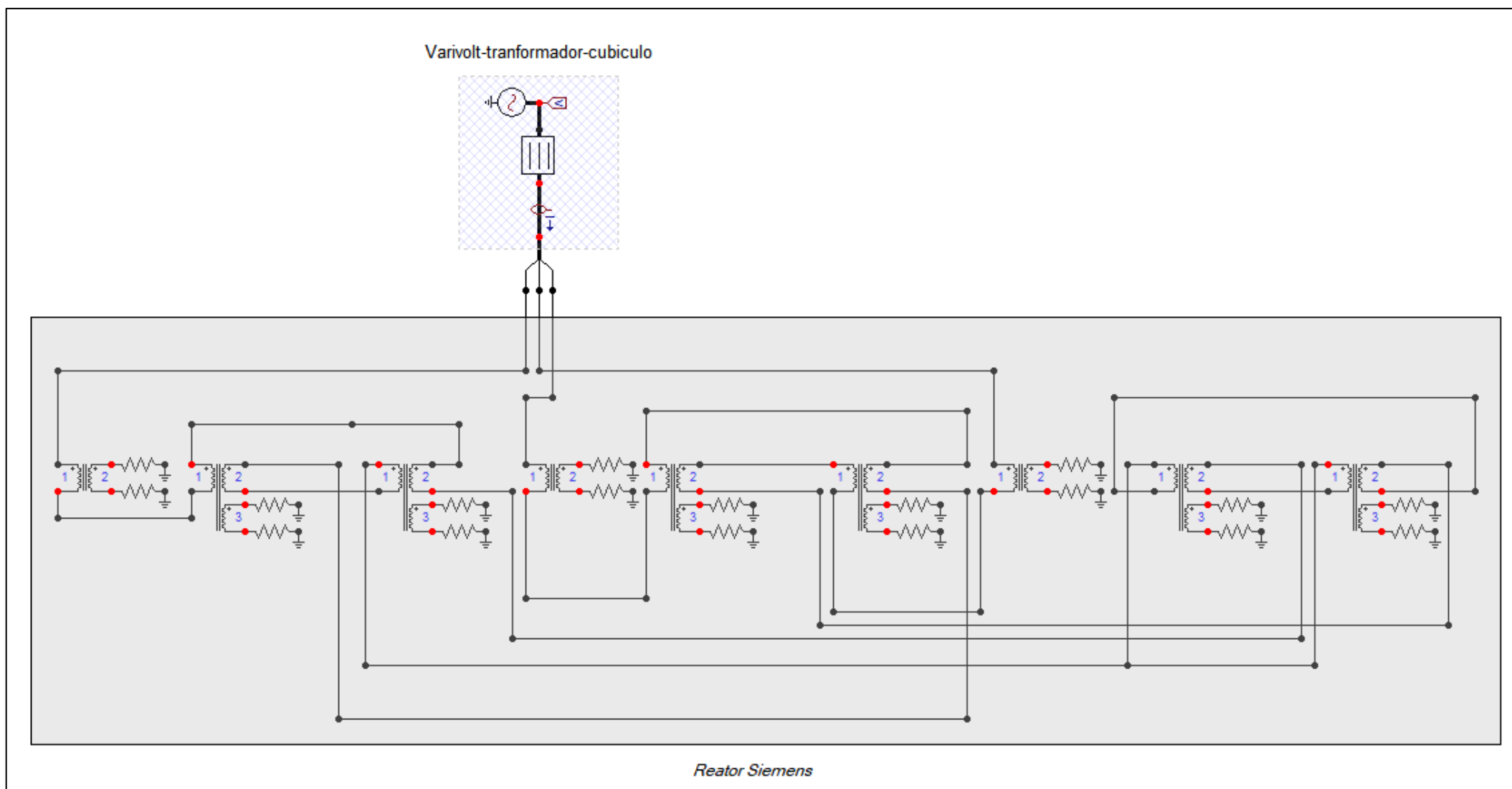
Tabela 8 – Valores de Fluxo-corrente da bobina N1.

Fluxo (volt-seg)	Corrente(A)
0,0208	0,0311
0,0383	0,0468
0,0534	0,0606
0,0781	0,0807
0,0945	0,0953
0,1196	0,1131
0,1332	0,1258
0,1522	0,1409
0,1741	0,1636
0,1936	0,1940
0,2064	0,2193
0,2253	0,2740
0,2466	0,3433
0,2650	0,5141
0,2872	0,6522
0,3019	0,8019
0,3222	1,0444
0,3392	1,2933
0,3566	1,6569
0,3826	2,5083
0,3958	3,4412
0,4156	6,0166
0,4304	9,8258
0,4473	16,9960
0,4652	29,4954
0,4919	47,7512
0,5082	59,9427
0,5170	66,5859

Fonte: Autor.

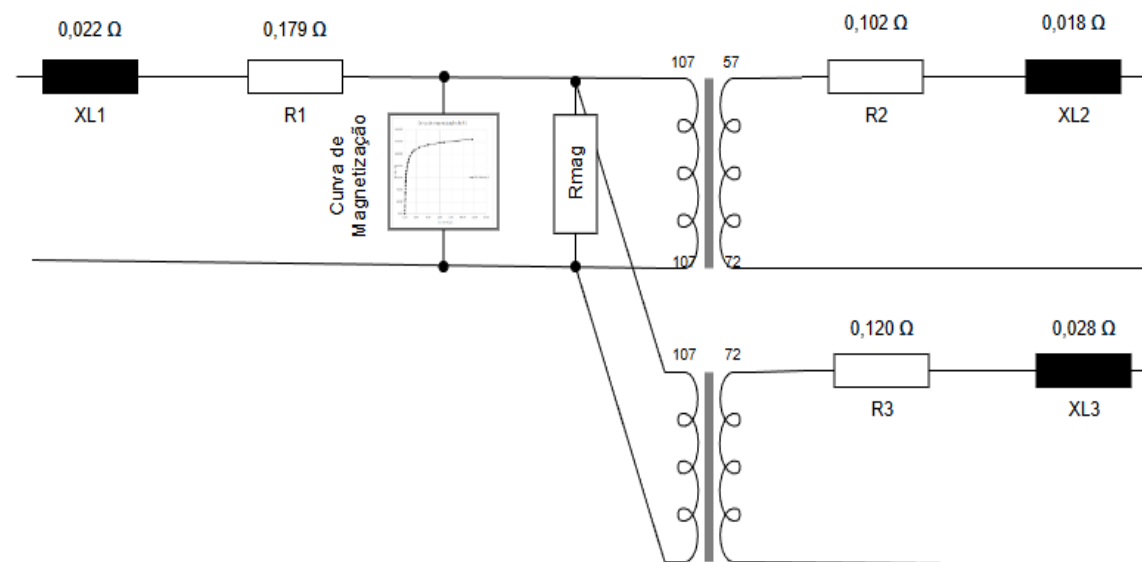
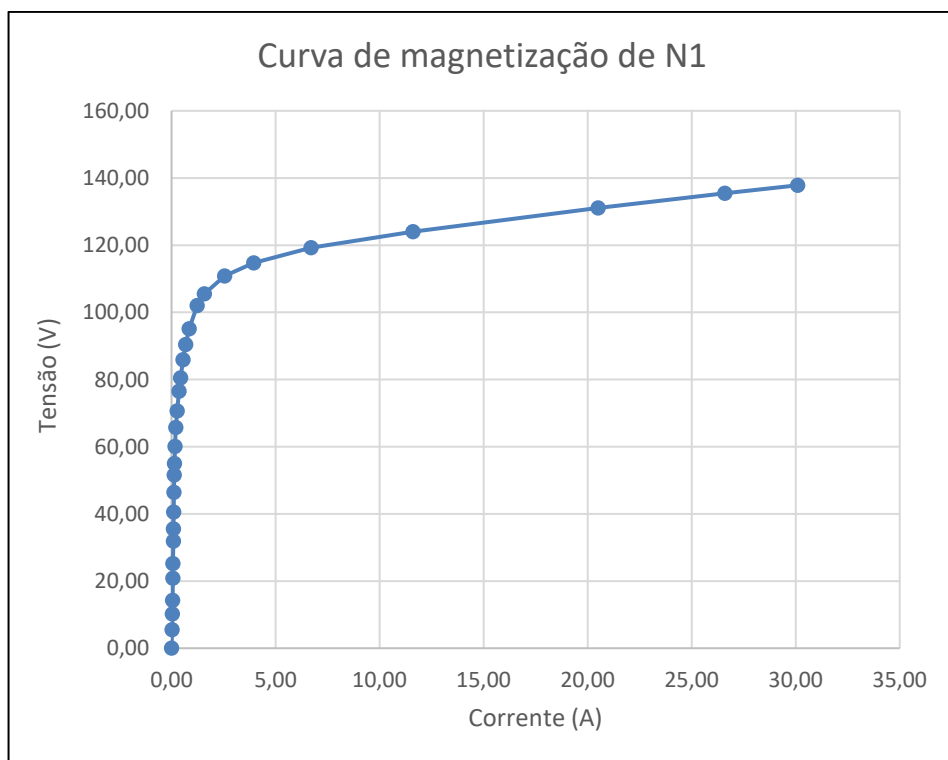
Com os parâmetros definidos, foi feita a interligação dos transformadores monofásicos no ATPDraw, de modo a replicar o diagrama elétrico do reator apresentado na Figura 2. O circuito completo, modelado e montado na plataforma ATPDraw, é ilustrado na Figura 46. Já a Figura 47 mostra o modelo para a coluna de 3 enrolamentos do ATP.

Figura 46 –Reator Siemens modelado no ATPDraw.



Fonte: Autor.

Figura 47 –Modelo da coluna para 3 enrolamento.



Fonte: Autor.

4.2.2 Programa computacional

A validação do modelo ATP requer a geração de uma curva $V \times I$ simulada que seja diretamente comparável à curva experimental. O levantamento em laboratório resultou em 25 pontos de medição distintos. Para replicar este ensaio no ambiente de simulação, seria necessário criar 25 arquivos de caso (.atp) individualmente, modificar manualmente o parâmetro da fonte de tensão em cada um, executar as simulações sequencialmente e, por fim, extrair os 25 valores de corrente resultantes para a montagem do gráfico.

Este processo manual é não apenas extensivo e demorado, mas também suscetível a erros de transcrição e manipulação de dados. Para mitigar esta dificuldade e otimizar o processo de validação, o autor desenvolveu uma ferramenta computacional em python dedicada à automação deste fluxo de trabalho.

O programa, cuja interface gráfica é apresentada na Figura 48, opera na seguinte sequência:

- **Entrada de Dados:** o usuário fornece ao programa um arquivo de caso base (.xml) e uma planilha (.xlsx) contendo a lista de valores de tensão a serem simulados, neste caso, os 25 pontos.
- **Geração de Casos:** a ferramenta lê o caso base e, iterativamente, gera um novo arquivo .xml para cada valor de tensão de entrada, ajustando o parâmetro da fonte de tensão em cada arquivo.
- **Execução em Lote (Batch):** O programa invoca o ATP (executando o "ATP draw") e simula sequencialmente todos os casos gerados. O processo é totalmente automático, abrindo, executando e fechando cada simulação sem intervenção do usuário.
- **Extração de Dados:** Concluídas as simulações, a ferramenta realiza a leitura (*parsing*) dos arquivos de saída de cada caso, extraindo os valores de interesse, neste caso, tensão de entrada e corrente de excitação de regime.
- **Saída (Planilha):** Finalmente, o programa compila todos os pares de valores (Tensão, Corrente) em uma única planilha de saída, pronta para a plotagem da curva $V \times I$ simulada e para a análise comparativa.

Figura 48 – Interface do programa computacional.



Fonte: Autor.

4.2.3 Comparação dos resultados

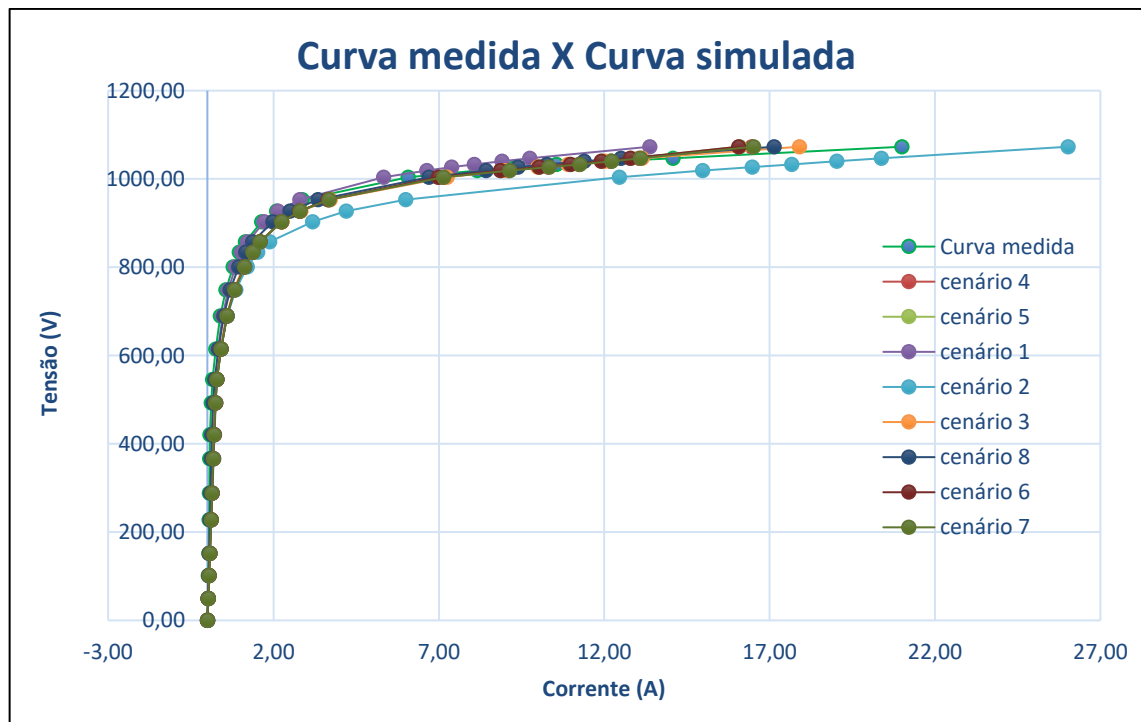
Esta seção é dedicada à etapa de validação do modelo, onde os resultados obtidos por simulação no ATP são comparados com os dados experimentais. O objetivo é aferir a acurácia do modelo e o impacto das diferentes parametrizações propostas pelo autor.

A análise comparativa será focada na característica da curva $V \times I$. Inicialmente, serão apresentados gráficos de comparação em pares, contrapondo a curva original do equipamento, medida em laboratório, com as curvas simuladas resultantes de ajustes específicos, para analisar a sensibilidade, no modelo.

Posteriormente, a Figura 49 apresentará uma sobreposição de todas as curvas, a experimental e as diversas simulações, permitindo uma avaliação visual consolidada da aderência de cada modelo.

As tabelas contendo os valores numéricos de Tensão (V) e Corrente (I) de cada curva obtida via simulação, que foram utilizados para a geração destes gráficos, encontram-se compiladas no APÊNDICE C.

Figura 49 – Sobreposição de todas as curvas VxI.



Fonte: Autor.

4.2.3.1 Cenário 1: Modelo Base

O **Cenário 1**, que serve como **Modelo Base** para a comparação, foi construído utilizando os valores médios de resistência e reatância (apresentados na Tabela 6). Para os dados da curva de magnetização, utilizaram-se as curvas V x I em PU da Tabela 9 e da Tabela 10, que foram processadas pela rotina *SATURATION* do ATP. A curva de Fluxo-Corrente resultante de N0 foi aplicada ao modelo de 2 enrolamentos, e a curva de N1 ao modelo de 3 enrolamentos.

Tabela 9 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N0.

V_{Base}	I_{Base}
160	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,0581	0,0028
0,1146	0,0047
0,1685	0,0065
0,2548	0,0087
0,3136	0,0104
0,3988	0,0130

V_{Base}	I_{Base}
160	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,4587	0,0156
0,5529	0,0222
0,6060	0,0301
0,6861	0,0460
0,7530	0,0674
0,8158	0,0952
0,8687	0,1436
0,9205	0,2349
0,9437	0,3161
0,9767	0,5760
1,0140	0,8430
1,0696	1,5060

Fonte: Autor.

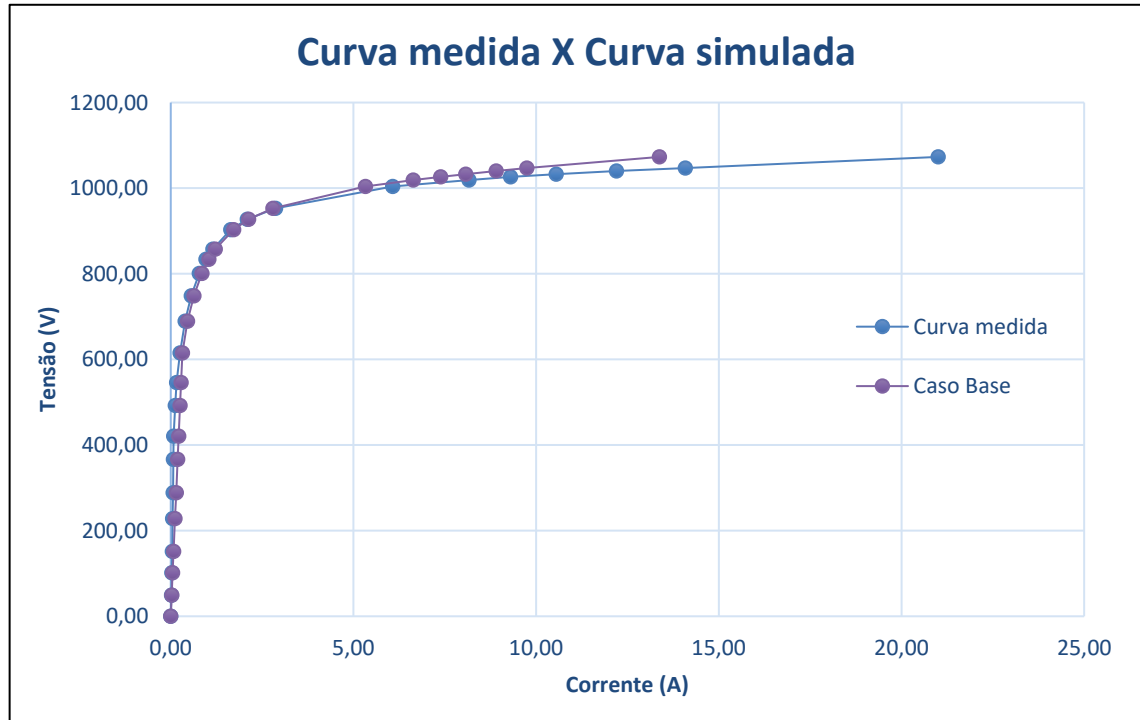
Tabela 10 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N1.

V_{Base}	I_{Base}
120	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,0576	0,0037
0,1136	0,0055
0,1669	0,0075
0,2525	0,0103
0,3107	0,0121
0,3951	0,0152
0,4544	0,0179
0,5478	0,0261
0,6004	0,0345
0,6797	0,0522
0,7460	0,0731
0,8083	0,1061
0,8607	0,1454
0,9120	0,2215
0,9350	0,2965
0,9677	0,4450
1,0046	0,8010
1,0597	1,3450

Fonte: Autor.

A Figura 50 compara a curva simulada deste cenário com a curva experimental. Observa-se uma boa aderência nos pontos iniciais, entretanto, a simulação apresenta divergências na região de saturação, indicando a necessidade de ajustes no modelo.

Figura 50 – Comparação da Curva VxI Caso Base.



Fonte: Autor.

4.2.3.2 Cenário 2: Interpolação com curva N2 ($\alpha = 0,5$)

Considerando que os dados experimentais de N0 e N1 (Tabela 9 e Tabela 10) atingem apenas 20-40% acima da corrente nominal, enquanto o ensaio de N2 alcançou 80%, propôs-se o **Cenário 2**. Este cenário utiliza uma nova curva de magnetização, gerada por uma interpolação linear (Equação (4.11)) entre os dados de N1/N0 e os dados de N2. O objetivo é estender a curva de saturação para valores de corrente mais elevados. Neste primeiro teste, foi adotado um fator de interpolação $\alpha = 0,5$.

$$I_{Novo} = (1 - \alpha)I_{Menor} + \alpha I_{Maior} \quad (4.11)$$

Abaixo encontra-se a tabela com os valores em PU resultantes desta interpolação para N0 e N1, respectivamente.

Tabela 11 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N0 gerado da interpolação com N2.

$\alpha = 0,5$	
V_{Base}	I_{Base}
160	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,0581	0,0028
0,1146	0,0047
0,1685	0,0065
0,2548	0,0087
0,3136	0,0104
0,3988	0,0130
0,4587	0,0156
0,5529	0,0222
0,6060	0,0301
0,6861	0,0460
0,7530	0,0674
0,8158	0,0952
0,8687	0,1436
0,9205	0,2349
0,9437	0,3161
0,9767	0,5760
1,0140	0,8430
1,0696	1,5060

Fonte: Autor.

Tabela 12 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N1 gerado da interpolação com N2.

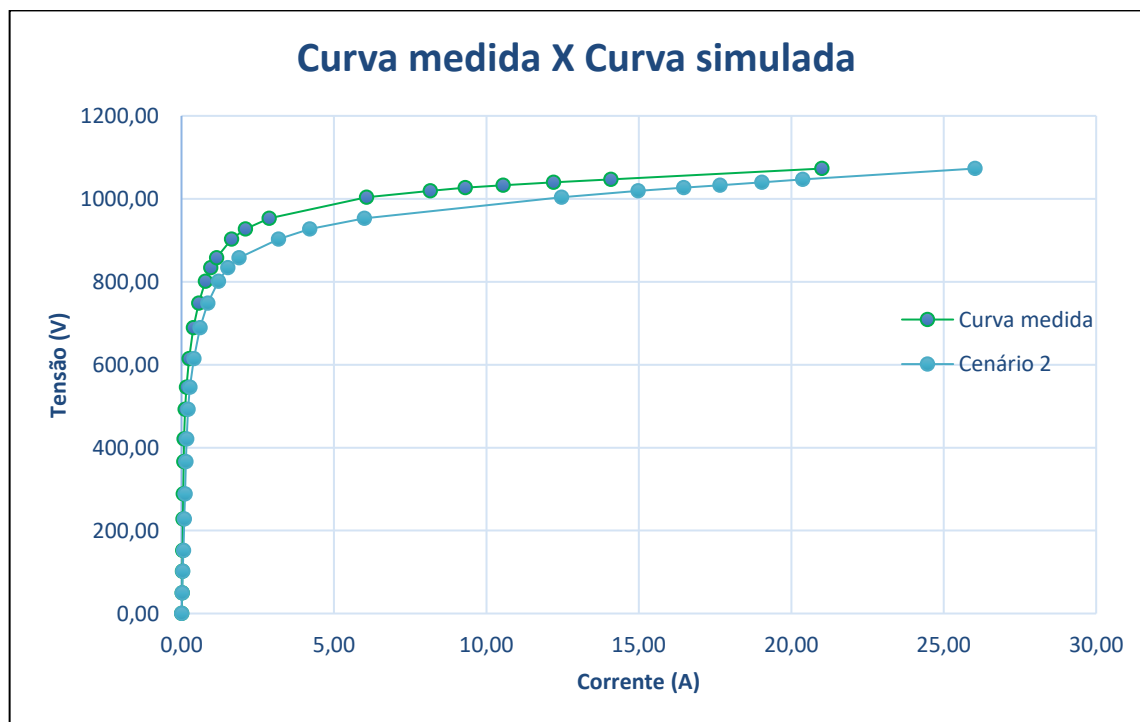
$\alpha = 0,5$	
V_{Base}	I_{Base}
120	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,05296	0,00248
0,10685	0,00418
0,16847	0,00580
0,23776	0,00768
0,30166	0,00928
0,37719	0,01156
0,43721	0,01398
0,51067	0,01980
0,56631	0,02724
0,63860	0,04184
0,70824	0,06190
0,76533	0,08748
0,82517	0,13396

$\alpha = 0,5$	
V_{Base}	I_{Base}
120	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,87210	0,26095
0,89264	0,34550
0,92993	0,59000
0,97212	1,09000
1,00398	1,59000

Fonte: Autor.

A Figura 51 contém a comparação da simulação com a medição.

Figura 51 – Comparação da Curva VxI Cenário 2.



Fonte: Autor.

4.2.3.3 Cenário 3: Ajuste da Interpolação ($\alpha = 0,3$)

No Cenário 1 os valores de correntes encontrado para os últimos pontos medidos de tensão eram baixos comparados aos valores reais e no Cenário 2 com uma interpolação de dados e um alpha de 0,5 os valores de corrente para os pontos finais ficaram maiores que os medidos, com isso foi gerado um novo caso com um valor de alpha de 0,3.

A análise do Cenário 2 (Figura 51) revelou que o fator de interpolação $\alpha = 0,5$ superestimou a corrente de saturação em comparação aos valores medidos. Para um ajuste mais fino, o **Cenário 3** foi desenvolvido, reduzindo o fator de interpolação para $\alpha = 0,3$. A Tabela 13 e Tabela 14 apresentam os dados em PU para este novo cenário.

Abaixo encontra-se a tabela com os valores em PU para as bobinas N0 e N1.

Tabela 13 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N0 gerado da interpolação com N2.

$\alpha = 0,3$	
V_{Base}	I_{Base}
160	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,0581	0,0028
0,1146	0,0047
0,1685	0,0065
0,2548	0,0087
0,3136	0,0104
0,3988	0,0130
0,4587	0,0156
0,5529	0,0222
0,6060	0,0301
0,6861	0,0460
0,7530	0,0674
0,8158	0,0952
0,8687	0,1436
0,9205	0,2349
0,9437	0,3161
0,9767	0,5760
1,0140	0,8430
1,0696	1,5060

Fonte: Autor.

Tabela 14 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N1 gerado da interpolação com N2.

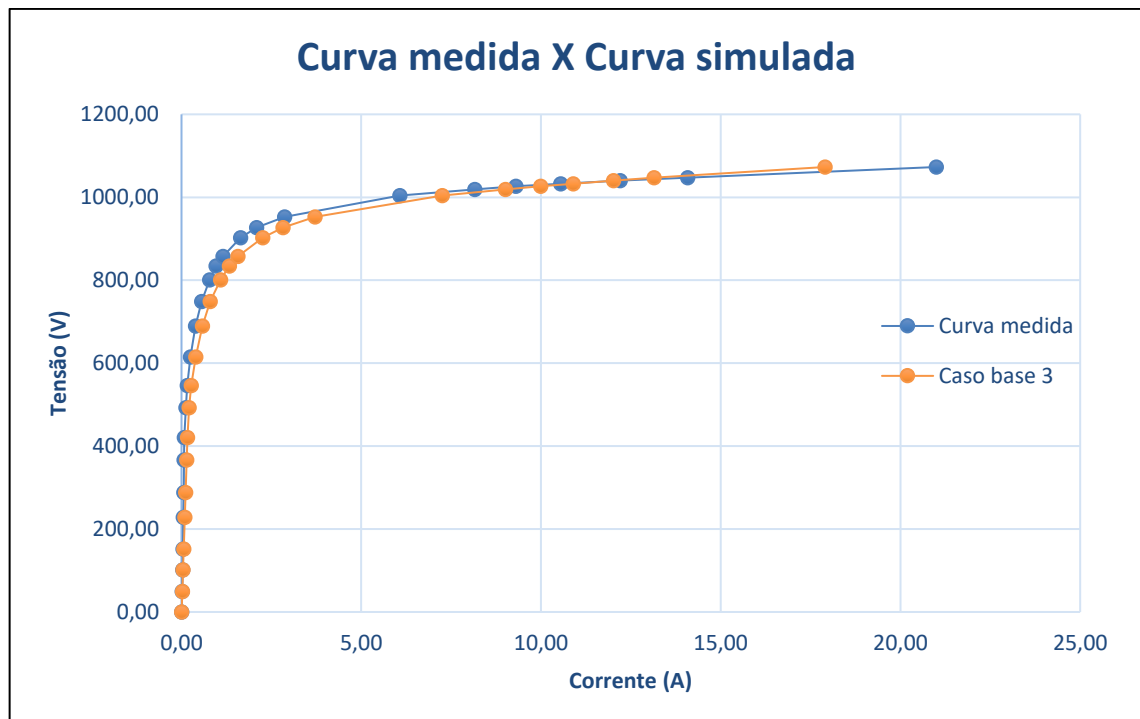
$\alpha = 0,3$	
V_{Base}	I_{Base}
120	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,05296	0,00248
0,10685	0,00418
0,16847	0,00580
0,23776	0,00768
0,30166	0,00928

$\alpha = 0,3$	
V_{Base}	I_{Base}
120	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,37719	0,01156
0,43721	0,01398
0,51067	0,01980
0,56631	0,02724
0,63860	0,04184
0,70824	0,06190
0,76533	0,08748
0,82517	0,13396
0,87210	0,26095
0,89264	0,34550
0,92993	0,59000
0,97212	1,09000
1,00398	1,59000

Fonte: Autor.

A Figura 52 contém a curva de comparação para este ajuste.

Figura 52 – Comparação da Curva VxI Cenário 3.



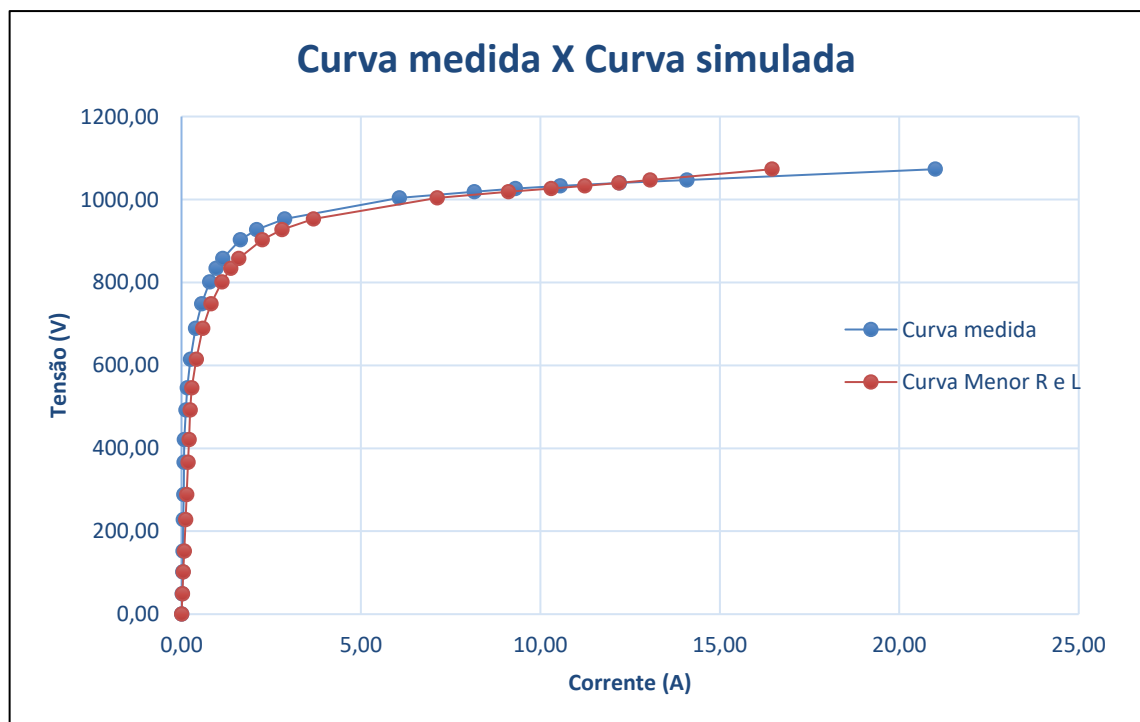
Fonte: Autor.

4.2.3.4 Cenário 4-7: Análise de Sensibilidade aos Parâmetros R e L

O Cenário 3 (Figura 52) apresentou uma boa aderência à curva experimental. A partir deste ponto, foi iniciada uma análise de sensibilidade aos parâmetros lineares do reator (R e L), utilizando a curva de magnetização definida no Cenário 3 como base.

- **Cenário 4:** neste cenário, utilizam-se os valores mínimos de resistência (R) e indutância (L) encontrados nos ensaios (Tabela 4). A Figura 53 mostra a comparação.

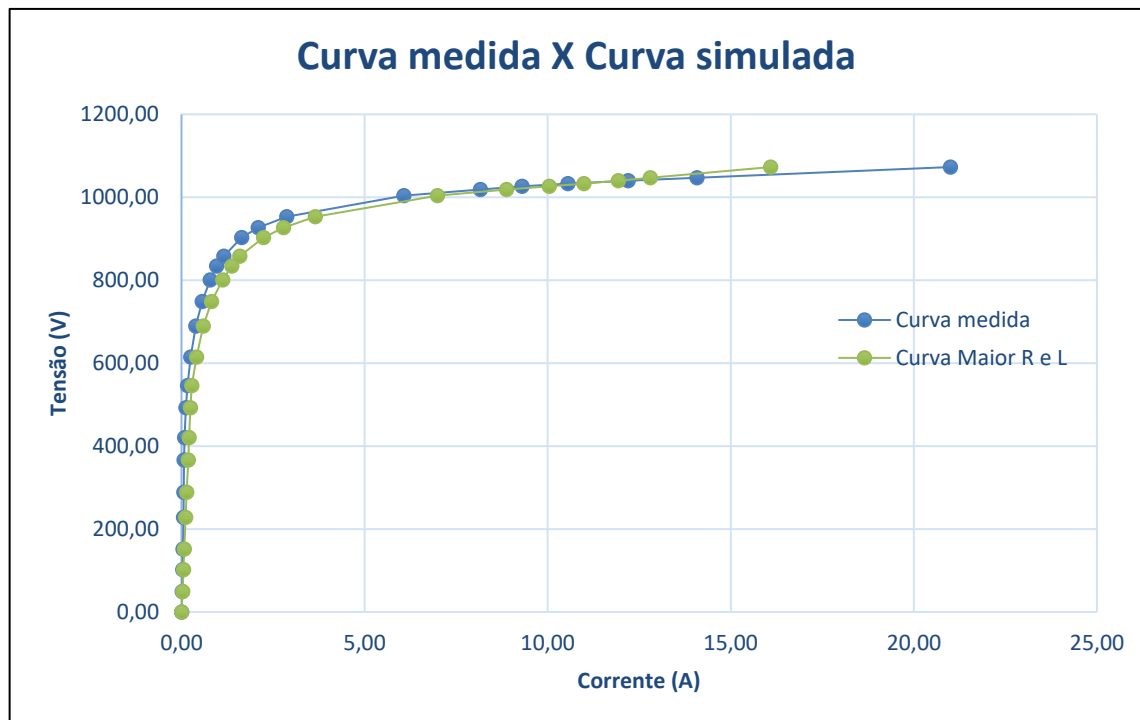
Figura 53 – Comparação da Curva VxI: Cenário 4 (R min, L min).



Fonte: Autor.

- **Cenário 5:** testa o impacto dos valores máximos de R e L (Tabela 4). A Figura 54 mostra a comparação.

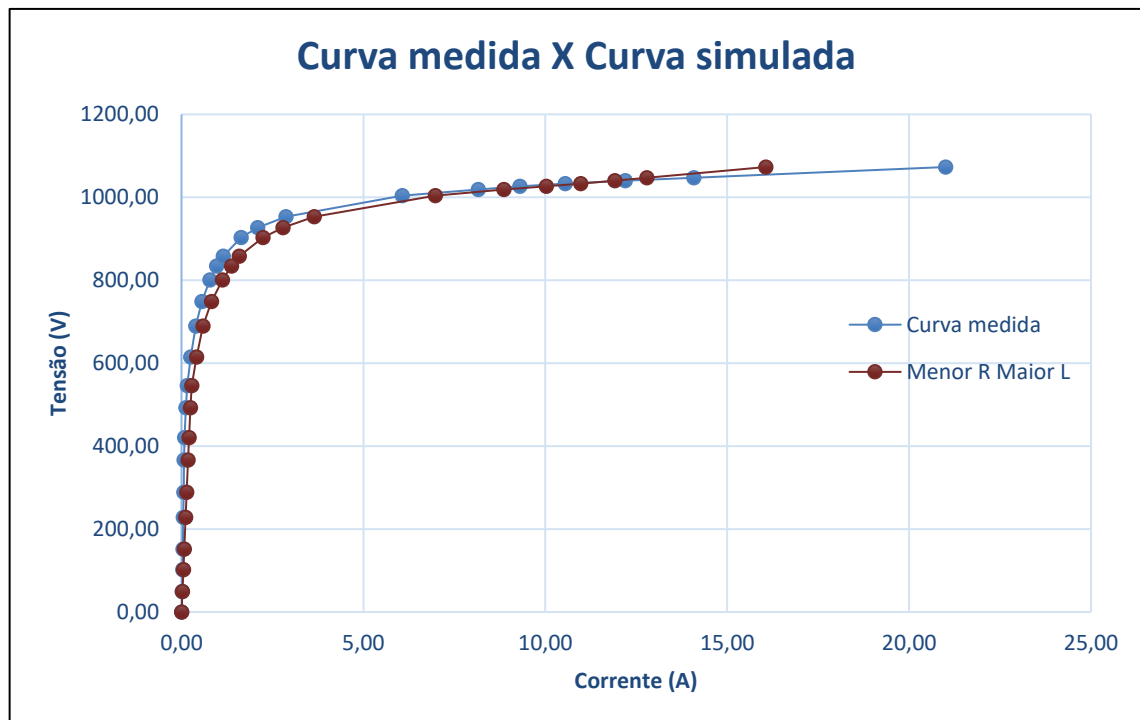
Figura 54 – Comparação da Curva VxI: Cenário 5 (R max, L max).



Fonte: Autor.

- **Cenário 6:** O Cenário 6 avalia o caso combinado de resistência mínima (R min) e indutância máxima (L max) (
- Tabela 4). A Figura 55 mostra a comparação.

Figura 55 – Comparação da Curva VxI: Cenário 6 (R min, L max).

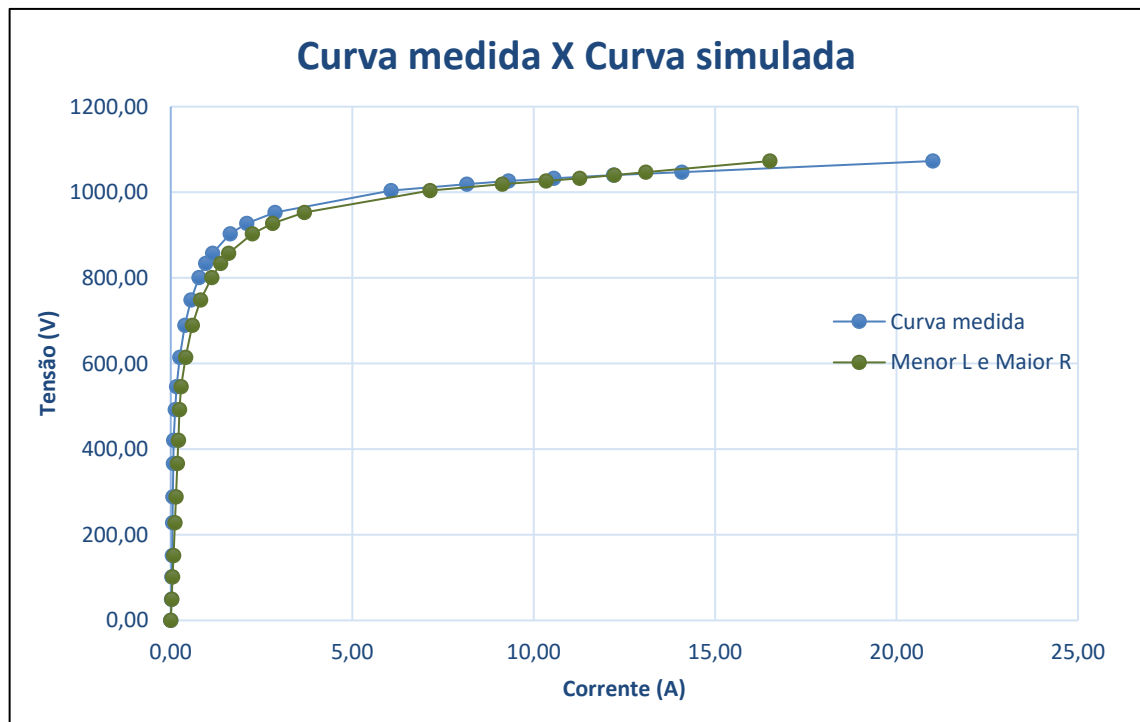


Fonte: Autor.

- **Cenário 7:**

O Cenário 7 é utilizado o menor L e maior R encontrado na Tabela 4. A Figura 56 traz a comparação da curva simulada e medida.

Figura 56 – Comparação da Curva VxI: Cenário 7 (R max, L min).



Fonte: Autor.

4.2.3.5 Cenário 8: Extrapolação da curva de saturação (Modelo Base)

O Cenário 8 testa uma abordagem alternativa, retornando ao Modelo Base (Cenário 1). A estratégia foi ajustar a extrapolação da rotina *SATURATION* através da adição de pontos fictícios aos dados originais de N0 e N1. Esta abordagem foi motivada pela limitação de pontos medidos na região de saturação. Um ponto de extrapolação foi adicionado para forçar uma inclinação maior na curva gerada. A Tabela 15 e Tabela 16 mostram esses valores em PU onde o último ponto foi criado para gerar uma inclinação maior.

Tabela 15 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N0 (com extrapolação).

V_{Base}	I_{Base}
160	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,05581	0,00180
0,11325	0,00310
0,18163	0,00440
0,25206	0,00570
0,32225	0,00700
0,40125	0,00870
0,46600	0,01070

V_{Base}	I_{Base}
160	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,54000	0,01510
0,60063	0,02160
0,67663	0,03350
0,75238	0,05090
0,81250	0,07200
0,87875	0,11470
0,92813	0,19590
0,95313	0,27200
0,99938	0,55500
1,01969	0,78000
1,05175	1,19000
1,06388	1,38000
1,06875	1,70000

Fonte: Autor.

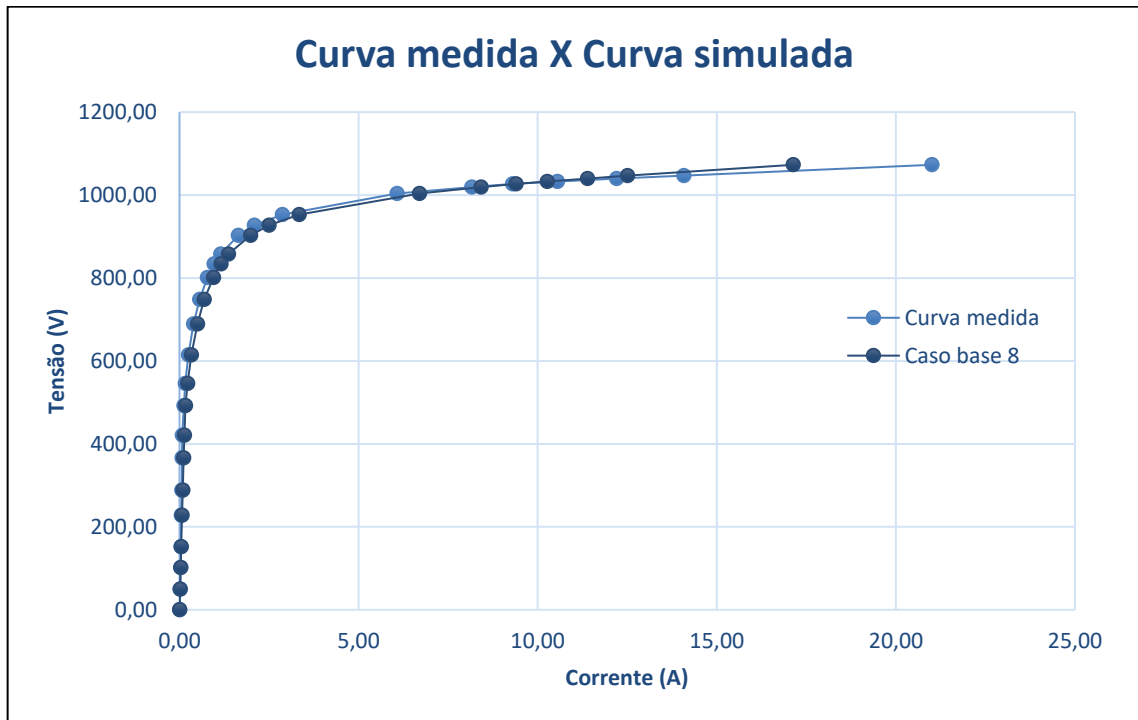
Tabela 16 – Tensão e Corrente em PU da Bobina N1 (com extrapolação).

V_{Base}	I_{Base}
120	10
Tensão (V)	Corrente (A)
0,07300	0,00300
0,11167	0,00420
0,16750	0,00580
0,25400	0,00800
0,30933	0,00940
0,39267	0,01180
0,45250	0,01420
0,54725	0,02160
0,60500	0,02990
0,68325	0,04600
0,74467	0,06450
0,81467	0,09720
0,85992	0,13220
0,90667	0,20840
0,93500	0,29610
0,96633	0,46460
1,01408	0,93000
1,05483	1,47000
1,06500	1,80000

Fonte: Autor.

A Figura 57 mostra a comparação da curva medida com a simulação deste novo caso.

Figura 57 – Comparação da Curva VxI: Cenário 8 (Extrapolação).



Fonte: Autor.

4.2.3.6 Cenário 9: Modelo Final

O Cenário 8 demonstrou que a extrapolção manual se aproximava da curva real, mas também expôs a limitação dos dados de entrada. Para resolver esta questão, novas medições experimentais foram realizadas, focando na obtenção de mais pontos na região de saturação para N0 e N1.

A Tabela 17 e Tabela 18 apresentam estes novos dados experimentais (Valores de VxI levantado em laboratório). O Cenário 9, considerado o Modelo Final, foi construído utilizando estes novos dados. Os valores completos em PU utilizados na rotina *SATURATION* encontram-se no APÊNDICE A.

Tabela 17 – Tensão e Corrente medida na Bobina N0.

Tensão (V) Rms	Corrente (A) Rms
0,00	0,00
5,72	0,01
10,33	0,02

Tensão (V) Rms	Corrente (A) Rms
14,95	0,03
20,85	0,03
25,34	0,04
30,41	0,05
34,79	0,05
40,00	0,06
44,90	0,06
50,97	0,07
55,22	0,08
60,77	0,08
65,50	0,09
71,56	0,10
74,96	0,11
80,17	0,13
85,80	0,15
90,69	0,18
94,96	0,21
100,31	0,25
105,77	0,31
110,27	0,36
114,39	0,42
119,97	0,50
125,44	0,61
130,50	0,74
134,68	0,88
139,50	1,10
145,90	1,63
151,17	2,50
156,27	3,96
161,61	6,90
165,82	9,90
170,70	14,20
175,72	19,10
179,40	23,00

Fonte: Autor.

Tabela 18 – Tensão e Corrente medida na Bobina N1.

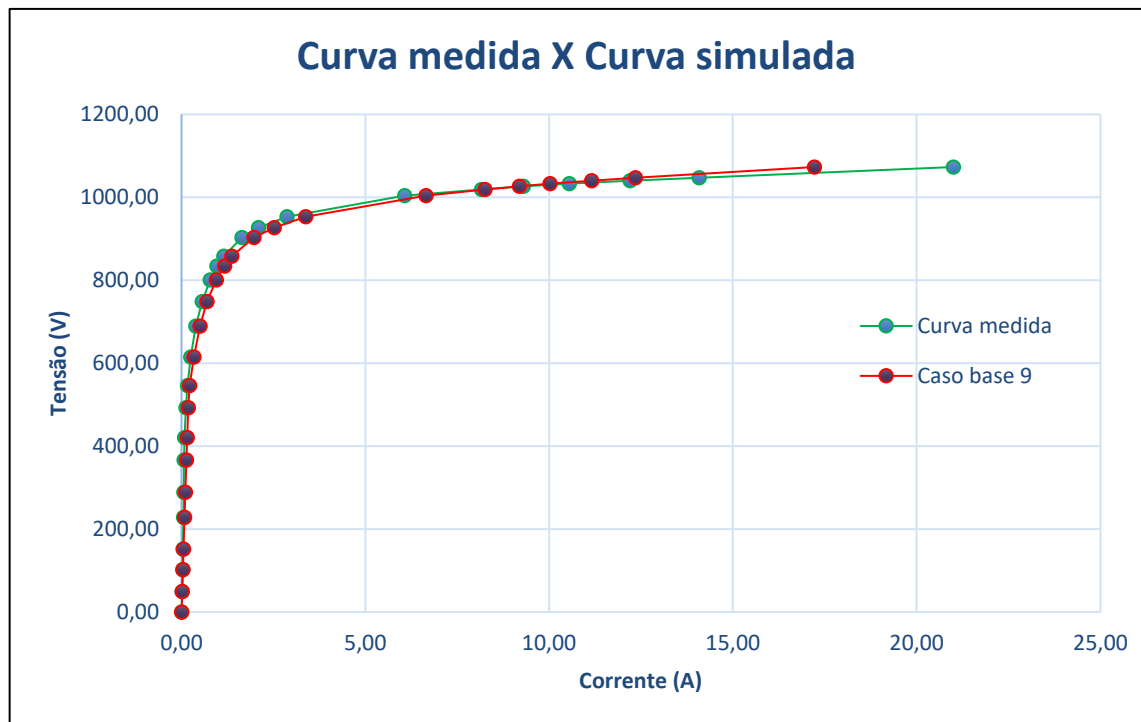
Tensão (V) Rms	Corrente (A) Rms
0,00	0,00
5,54	0,022
10,22	0,035
14,24	0,045
20,83	0,06

Tensão (V) Rms	Corrente (A) Rms
25,18	0,07
31,87	0,084
35,51	0,092
40,57	0,103
46,4	0,117
51,6	0,133
55,03	0,146
60,05	0,172
65,74	0,209
70,65	0,274
76,55	0,36
80,48	0,431
85,89	0,554
90,43	0,68
95,07	0,849
101,99	1,234
105,52	1,574
110,79	2,556
114,74	3,947
119,23	6,7
124	11,6
131,12	20,5
135,46	26,6
137,83	30,1

Fonte: Autor.

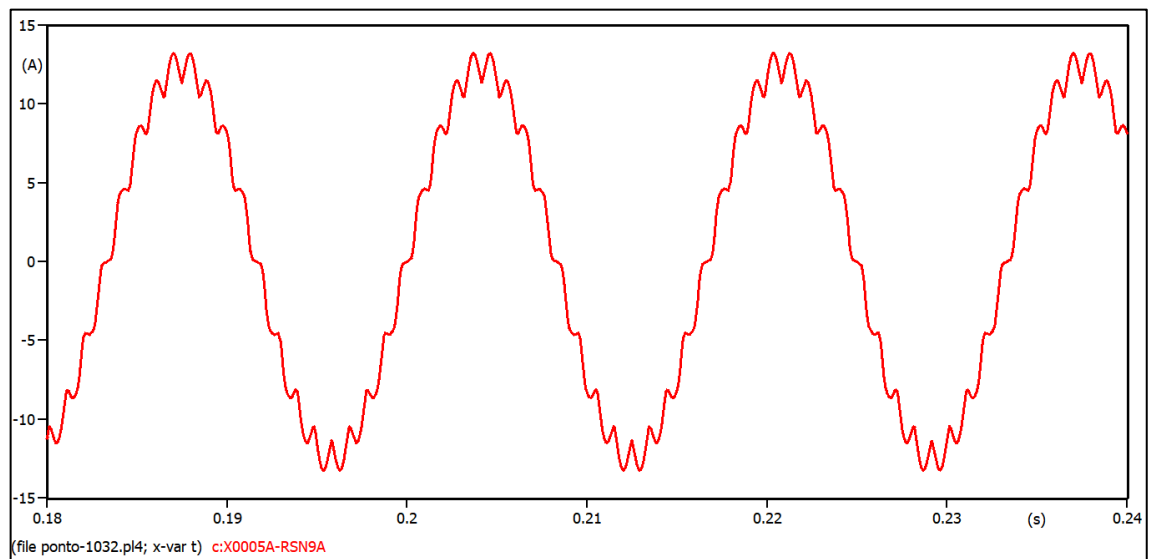
A Figura 58 faz a comparação dos pontos para o modelo final. Já a Figura 59 mostra a forma de onda de corrente do modelo no ATP para uma fase e a Figura 61 para as 3 fases. Já na Figura 63 mostra o espectro harmônico do modelo simulado.

Figura 58 – Comparação da Curva VxI: Cenário 9 (Modelo Final com Novos Dados).



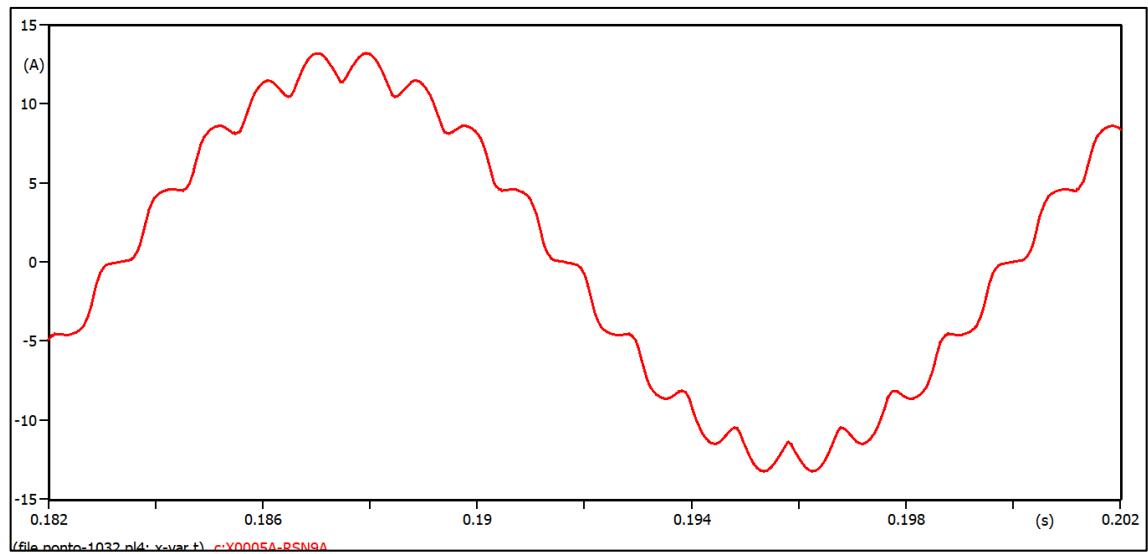
Fonte: Autor.

Figura 59 – Forma de onda de corrente do Modelo Final para 1 fase.



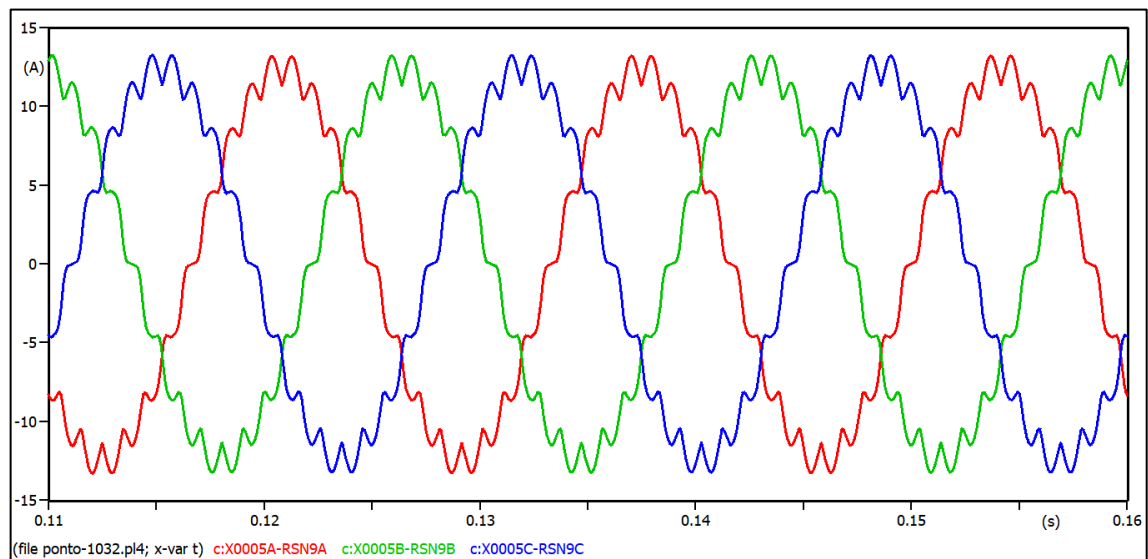
Fonte: Autor.

Figura 60 – Forma de onda de corrente do Modelo Final para 1 fase (Zoom).



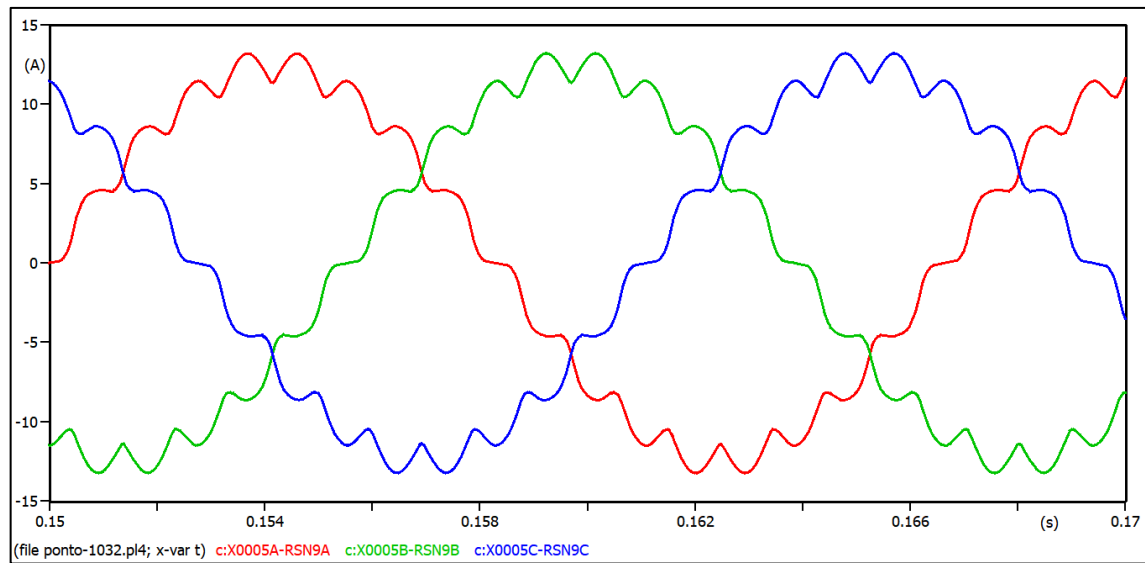
Fonte: Autor.

Figura 61 – Forma de onda de corrente do Modelo Final para 3 fases.



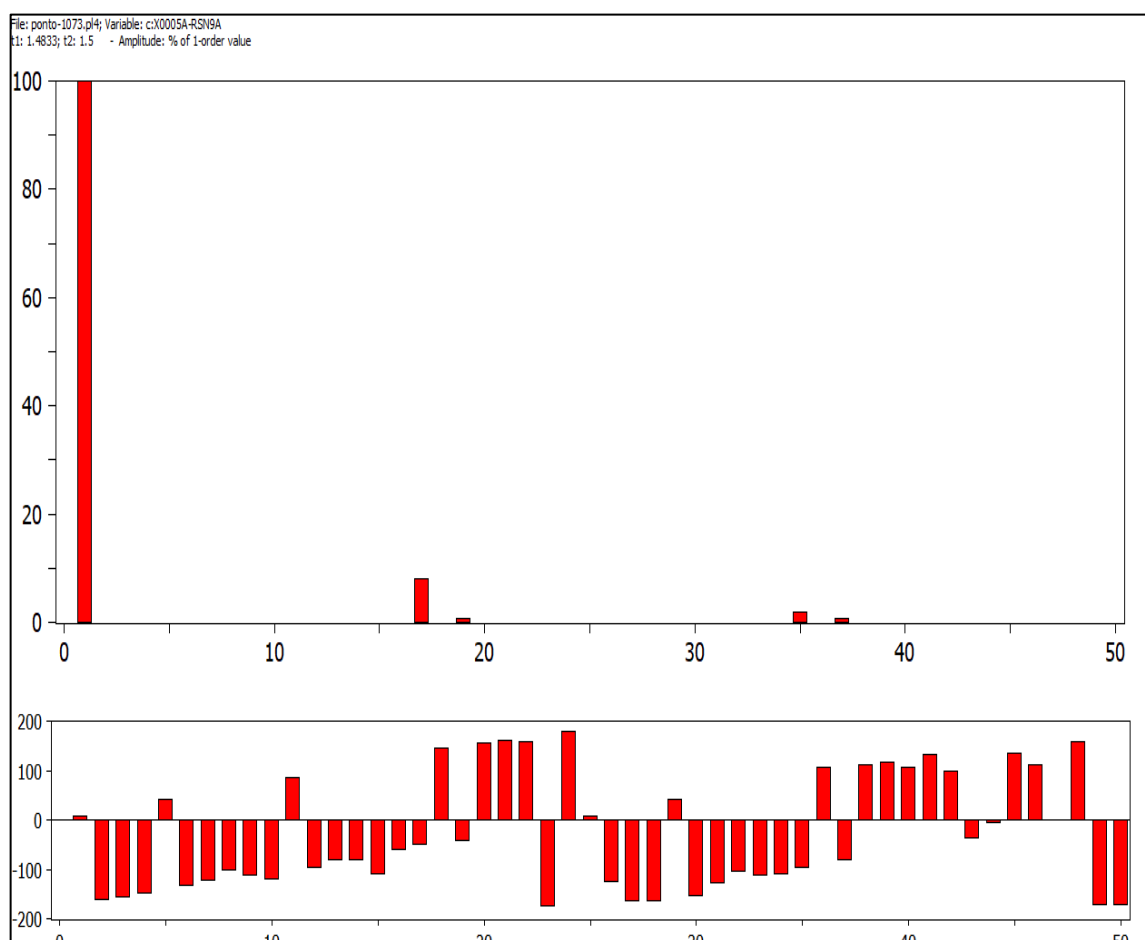
Fonte: Autor.

Figura 62 – Forma de onda de corrente do Modelo Final para 3 fases (zoom).



Fonte: Autor.

Figura 63 – Espectro harmônico do modelo simulado.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÃO

O presente trabalho propôs e validou uma metodologia para a modelagem de um reator de saturação complexo no programa computacional ATP, utilizando parâmetros obtidos por meio de ensaios laboratoriais.

A partir da análise comparativa apresentada (Seção 4.2.3), conclui-se que o modelo desenvolvido, em particular o Cenário 9, alcançou uma representação satisfatória do comportamento do equipamento real. A aderência entre a curva $V \times I$ simulada e a experimental valida o modelo proposto e a metodologia de ensaios utilizada, cumprindo com sucesso o objetivo principal deste TCC.

Uma das constatações mais relevantes deste estudo foi obtida através da análise de sensibilidade (Cenários 4 a 7). Foi demonstrado que a curva $V \times I$ simulada apresenta baixa sensibilidade às variações dos parâmetros lineares do reator (Resistência R e Reatância de Dispersão L). Mesmo com a alternância entre os valores máximos, mínimos e intermediários de R e L , a curva de magnetização final sofreu alterações marginais.

Este achado reforça que o componente de maior impacto e, portanto, o ponto crítico para a fidelidade de um modelo deste tipo, é a correta caracterização da curva de saturação não linear ($V \times I$). A precisão do levantamento desta curva em laboratório e sua correta representação no ATP (via rotina *SATURATION*) são os fatores dominantes para o sucesso da modelagem.

As divergências residuais observadas entre o modelo final e o equipamento real podem ser atribuídas a fatores como as simplificações adotadas na modelagem e as incertezas e erros intrínsecos dos próprios equipamentos de medição.

Em suma, o trabalho valida um método eficaz para a representação aproximada de reatores saturados de múltiplas colunas, fornecendo uma base sólida para futuras análises de comportamento transitório e de regime permanente deste equipamento no sistema elétrico.

5.1 Propostas de Continuidade

Para pesquisas futuras, algumas recomendações de temas são:

- Aplicação do Modelo em Estudos de Transitório;
Objetivo: validar o modelo para regime transitório.
- Validação Cruzada com Modelagem por Elementos Finitos (FEM);
Objetivo: comparar modelo no ATP com modelo no FEM.
- Análise Harmônica Detalhada;
Objetivo: quantificar o aspecto harmônico com a inserção do reator na rede.
- Modelagem das perdas no núcleo.
Objetivo; Refinamento do modelo.

REFERÊNCIAS

1. FONTE, L A M., **Desenvolvimento de reatores com saturação natural para aplicação em sistemas de potência**, Tese doutorado, UFPE, Recife, 2004.
2. BRASIL, D. O. C., ***Aplicação de Reatores Saturados em Sistemas de Transmissão***, Tese de mestrado, UFPE, Maio 1996.
3. VILLA VERDE, Marcos Antonio Rolim. ***Estimativas de Perdas em Estruturas Saturadas***, Tese de mestrado, UFPE, Recife, 2008.
4. FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas Elétricas**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.
5. CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
6. APERAM. *Electrical Steels: Sustainability and efficiency*. [S.l.]: Aperam, [s.d.]. Catálogo técnico.
7. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5356-6:2025 — Transformadores de potência — Parte 6: Reatores**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
8. FERREIRA, F. M. C., FONTE, L. A. M. e CARVALHO, M. A., ***Reator com Saturação Natural: Alguns Aspectos de Projeto e Aplicação***, VI SEPOPE, Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica, Salvador, 1998.
9. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5356-1:2025 — Transformadores de potência — Parte 1: Generalidades**. Rio de Janeiro: ABNT, 2025.

APÊNDICE A

Enrolamento N1

```

BEGIN NEW DATA CASE
SATURATION
$ERASE
C
C Enrolamento N1
C
C -FREQ) (-VBASE) (-SBASE)          (-KTHIRD
    60.  0.120  0.0012              0
C      I pu      ) (      V pu      )
      0.00220      0.04617
      0.00350      0.08517
      0.00450      0.11867
      0.00600      0.17358
      0.00700      0.20983
      0.00840      0.26558
      0.00920      0.29592
      0.01030      0.33808
      0.01170      0.38667
      0.01330      0.43000
      0.01460      0.45858
      0.01720      0.50042
      0.02090      0.54783
      0.02740      0.58875
      0.03600      0.63792
      0.04310      0.67067
      0.05540      0.71575
      0.06800      0.75358
      0.08490      0.79225
      0.12340      0.84992
      0.15740      0.87933
      0.25560      0.92325
      0.39470      0.95617
      0.67000      0.99358
      1.16000      1.03333
      2.05000      1.09267
      2.66000      1.12883
      3.01000      1.14858
          9999
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

Enrolamento N0

```

BEGIN NEW DATA CASE
SATURATION
$ERASE
C
C Enrolamento N0
C
C -FREQ) (-VBASE) (-SBASE)          (-KTHIRD
   60.  .1600  .0016                0
C      I pu      ) (      V pu      )
      0.00130      0.03575
      0.00200      0.06456
      0.00270      0.09344
      0.00340      0.13031
      0.00400      0.15838
      0.00460      0.19006
      0.00510      0.21744
      0.00570      0.25000
      0.00630      0.28063
      0.00700      0.31856
      0.00750      0.34513
      0.00820      0.37981
      0.00890      0.40938
      0.01000      0.44725
      0.01080      0.46850
      0.01250      0.50106
      0.01490      0.53625
      0.01770      0.56681
      0.02080      0.59350
      0.02520      0.62694
      0.03080      0.66106
      0.03600      0.68919
      0.04150      0.71494
      0.05030      0.74981
      0.06120      0.78400
      0.07400      0.81563
      0.08820      0.84175
      0.11000      0.87188
      0.16300      0.91188
      0.25010      0.94481
      0.39550      0.97669
      0.69000      1.01006
      0.99000      1.03638
      1.42000      1.06688
      1.91000      1.09825
      2.30000      1.12125
          9999
$PUNCH
BLANK
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

APÊNDICE B

```

BEGIN NEW DATA CASE
C -----
C Generated by ATPDraw novembro, 10, 2025
C from project C:\Users\joaovictor.melo\Desktop\RSN_siemens.acp
C ATPDraw developed by H. K. Høidalen at NTNU - NORWAY 1999-2022
C -----
C dT  >< Tmax >< Xopt >< Copt ><Epsiln>
C 1.E-5      .5      60.      60.
C      500      1      1      1      1      0      0      1      0
C      1      2      3      4      5      6      7      8
C 3456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><>0
TRANSFORMER      .03111.02078TX0001 1.E6      0
0.0311126984      0.0207838022
0.0467813486      0.0383399703
0.0606190802      0.0534202686
0.0806711529      0.0781384531
0.0952676448      0.0944566863
0.1131150074      0.1195530036
0.1258011173      0.1332108021
0.1408593703      0.1521894701
0.1635657575      0.174062655
0.1939926445      0.193568008
0.2193127302      0.2064335281
0.2740136826      0.2252681455
0.3432624748      0.2466101437
0.5141048909      0.2650306156
0.6522379838      0.2871648922
0.8018977716      0.3019075719
1.0443656369      0.3222007016
1.2932560016      0.3392301848
1.6568752101      0.3566378007
2.5083426085      0.3825984217
3.4411657691      0.3958375731
6.0166195115      0.4156085194
9.8258250354      0.430427726
16.996036462      0.4472681427
29.495374776      0.4651619295
47.751247092      0.4918743146
59.942715731      0.5081520336
66.585856778      0.5170426572
9999
1N1N2A N0N1C      .18 .022 107.
2N2N2A N2N1A      .1 .018 57.
3C2N3E C2N3S      .12 .028 72.
TRANSFORMER      .01838.02146TX0002 1.E6      0
0.0183847763      0.0214575389
0.0265073246      0.0387496142
0.0369439597      0.0560837044
0.0447750923      0.0782134794
0.0548474855      0.0950613988
0.0616868258      0.1140760794
0.0687618736      0.1305098532
0.0772254853      0.1500527194
0.086519896      0.1684371785
0.0953972865      0.1912031771
0.1029915268      0.2071507801
0.1140153758      0.2279660934
0.1269728548      0.245714329
0.1478756596      0.2684443149
0.1659159435      0.2811987961
0.204452437      0.3007416622
0.2539147529      0.321863083
0.3152549707      0.3402055274

```


0.3809623286	0.3562251558			
0.4627592199	0.3762962075			
0.5784428581	0.3967754026			
0.6742612003	0.4136593346			
0.785162414	0.4291147647			
0.9598189289	0.450044118			
1.1919352821	0.4705653279			
1.4695744892	0.489549998			
1.8120950512	0.5052275061			
2.3232134109	0.5233118598			
3.738454667	0.5473202949			
6.1886252769	0.5670852391			
10.071519552	0.5862199619			
18.332076811	0.6062489989			
25.329506712	0.6220465492			
35.377591299	0.6403529809			
45.472136526	0.6591815961			
53.541753364	0.6729864463			
9999				
1RSN9C N0N1C	.23	.07	144.	
2C1N3E C1N3S	.12	.028	72.	
TRANSFORMER	.01838	.02146	TX0003	1.E6
0.0183847763	0.0214575389			0
0.0265073246	0.0387496142			
0.0369439597	0.0560837044			
0.0447750923	0.0782134794			
0.0548474855	0.0950613988			
0.0616868258	0.1140760794			
0.0687618736	0.1305098532			
0.0772254853	0.1500527194			
0.086519896	0.1684371785			
0.0953972865	0.1912031771			
0.1029915268	0.2071507801			
0.1140153758	0.2279660934			
0.1269728548	0.245714329			
0.1478756596	0.2684443149			
0.1659159435	0.2811987961			
0.204452437	0.3007416622			
0.2539147529	0.321863083			
0.3152549707	0.3402055274			
0.3809623286	0.3562251558			
0.4627592199	0.3762962075			
0.5784428581	0.3967754026			
0.6742612003	0.4136593346			
0.785162414	0.4291147647			
0.9598189289	0.450044118			
1.1919352821	0.4705653279			
1.4695744892	0.489549998			
1.8120950512	0.5052275061			
2.3232134109	0.5233118598			
3.738454667	0.5473202949			
6.1886252769	0.5670852391			
10.071519552	0.5862199619			
18.332076811	0.6062489989			
25.329506712	0.6220465492			
35.377591299	0.6403529809			
45.472136526	0.6591815961			
53.541753364	0.6729864463			
9999				
1RSN9B N0N1B	.23	.07	144.	
2C7N3E C7N3S	.12	.028	72.	
TRANSFORMER	.01838	.02146	TX0004	1.E6
0.0183847763	0.0214575389			0
0.0265073246	0.0387496142			
0.0369439597	0.0560837044			
0.0447750923	0.0782134794			
0.0548474855	0.0950613988			
0.0616868258	0.1140760794			

0.0687618736	0.1305098532			
0.0772254853	0.1500527194			
0.086519896	0.1684371785			
0.0953972865	0.1912031771			
0.1029915268	0.2071507801			
0.1140153758	0.2279660934			
0.1269728548	0.245714329			
0.1478756596	0.2684443149			
0.1659159435	0.2811987961			
0.204452437	0.3007416622			
0.2539147529	0.321863083			
0.3152549707	0.3402055274			
0.3809623286	0.3562251558			
0.4627592199	0.3762962075			
0.5784428581	0.3967754026			
0.6742612003	0.4136593346			
0.785162414	0.4291147647			
0.9598189289	0.450044118			
1.1919352821	0.4705653279			
1.4695744892	0.489549998			
1.8120950512	0.5052275061			
2.3232134109	0.5233118598			
3.738454667	0.5473202949			
6.1886252769	0.5670852391			
10.071519552	0.5862199619			
18.332076811	0.6062489989			
25.329506712	0.6220465492			
35.377591299	0.6403529809			
45.472136526	0.6591815961			
53.541753364	0.6729864463			
9999				
1RSN9A NON1A	.23 .07 144.			
2C4N3E C4N3S	.12 .028 72.			
TRANSFORMER	.03111.02078TX0005	1.E6		0
0.0311126984	0.0207838022			
0.0467813486	0.0383399703			
0.0606190802	0.0534202686			
0.0806711529	0.0781384531			
0.0952676448	0.0944566863			
0.1131150074	0.1195530036			
0.1258011173	0.1332108021			
0.1408593703	0.1521894701			
0.1635657575	0.174062655			
0.1939926445	0.193568008			
0.2193127302	0.2064335281			
0.2740136826	0.2252681455			
0.3432624748	0.2466101437			
0.5141048909	0.2650306156			
0.6522379838	0.2871648922			
0.8018977716	0.3019075719			
1.0443656369	0.3222007016			
1.2932560016	0.3392301848			
1.6568752101	0.3566378007			
2.5083426085	0.3825984217			
3.4411657691	0.3958375731			
6.0166195115	0.4156085194			
9.8258250354	0.430427726			
16.996036462	0.4472681427			
29.495374776	0.4651619295			
47.751247092	0.4918743146			
59.942715731	0.5081520336			
66.585856778	0.5170426572			
9999				
1NEUTRON2N1A	.18 .022 107.			
2N1N2A N2N2C	.1 .018 57.			
3C3N3E C3N3S	.12 .028 72.			
TRANSFORMER	.03111.02078TX0006	1.E6		0
0.0311126984	0.0207838022			

0.0467813486	0.0383399703			
0.0606190802	0.0534202686			
0.0806711529	0.0781384531			
0.0952676448	0.0944566863			
0.1131150074	0.1195530036			
0.1258011173	0.1332108021			
0.1408593703	0.1521894701			
0.1635657575	0.174062655			
0.1939926445	0.193568008			
0.2193127302	0.2064335281			
0.2740136826	0.2252681455			
0.3432624748	0.2466101437			
0.5141048909	0.2650306156			
0.6522379838	0.2871648922			
0.8018977716	0.3019075719			
1.0443656369	0.3222007016			
1.2932560016	0.3392301848			
1.6568752101	0.3566378007			
2.5083426085	0.3825984217			
3.4411657691	0.3958375731			
6.0166195115	0.4156085194			
9.8258250354	0.430427726			
16.996036462	0.4472681427			
29.495374776	0.4651619295			
47.751247092	0.4918743146			
59.942715731	0.5081520336			
66.585856778	0.5170426572			
9999				
1N1N2C N0N1A	.18	.022	107.	
2N1N2B N2N2B	.1	.018	57.	
3C5N3E C5N3S	.12	.028	72.	
TRANSFORMER	.03111	.02078TX0007	1.E6	0
0.0311126984	0.0207838022			
0.0467813486	0.0383399703			
0.0606190802	0.0534202686			
0.0806711529	0.0781384531			
0.0952676448	0.0944566863			
0.1131150074	0.1195530036			
0.1258011173	0.1332108021			
0.1408593703	0.1521894701			
0.1635657575	0.174062655			
0.1939926445	0.193568008			
0.2193127302	0.2064335281			
0.2740136826	0.2252681455			
0.3432624748	0.2466101437			
0.5141048909	0.2650306156			
0.6522379838	0.2871648922			
0.8018977716	0.3019075719			
1.0443656369	0.3222007016			
1.2932560016	0.3392301848			
1.6568752101	0.3566378007			
2.5083426085	0.3825984217			
3.4411657691	0.3958375731			
6.0166195115	0.4156085194			
9.8258250354	0.430427726			
16.996036462	0.4472681427			
29.495374776	0.4651619295			
47.751247092	0.4918743146			
59.942715731	0.5081520336			
66.585856778	0.5170426572			
9999				
1N1N2B N0N1B	.18	.022	107.	
2N1N2C N2N2A	.1	.018	57.	
3C6N3E C6N3S	.12	.024	72.	
TRANSFORMER	.03111	.02078TX0008	1.E6	0
0.0311126984	0.0207838022			
0.0467813486	0.0383399703			
0.0606190802	0.0534202686			

0.0806711529	0.0781384531			
0.0952676448	0.0944566863			
0.1131150074	0.1195530036			
0.1258011173	0.1332108021			
0.1408593703	0.1521894701			
0.1635657575	0.174062655			
0.1939926445	0.193568008			
0.2193127302	0.2064335281			
0.2740136826	0.2252681455			
0.3432624748	0.2466101437			
0.5141048909	0.2650306156			
0.6522379838	0.2871648922			
0.8018977716	0.3019075719			
1.0443656369	0.3222007016			
1.2932560016	0.3392301848			
1.6568752101	0.3566378007			
2.5083426085	0.3825984217			
3.4411657691	0.3958375731			
6.0166195115	0.4156085194			
9.8258250354	0.430427726			
16.996036462	0.4472681427			
29.495374776	0.4651619295			
47.751247092	0.4918743146			
59.942715731	0.5081520336			
66.585856778	0.5170426572			
9999				
1NEUTRON2N1B	.18	.022	107.	
2N2N2C N2N1C	.1	.018	57.	
3C8N3E C8N3S	.12	.028	72.	
TRANSFORMER	.03111	.02078TX0009	1.E6	0
0.0311126984	0.0207838022			
0.0467813486	0.0383399703			
0.0606190802	0.0534202686			
0.0806711529	0.0781384531			
0.0952676448	0.0944566863			
0.1131150074	0.1195530036			
0.1258011173	0.1332108021			
0.1408593703	0.1521894701			
0.1635657575	0.174062655			
0.1939926445	0.193568008			
0.2193127302	0.2064335281			
0.2740136826	0.2252681455			
0.3432624748	0.2466101437			
0.5141048909	0.2650306156			
0.6522379838	0.2871648922			
0.8018977716	0.3019075719			
1.0443656369	0.3222007016			
1.2932560016	0.3392301848			
1.6568752101	0.3566378007			
2.5083426085	0.3825984217			
3.4411657691	0.3958375731			
6.0166195115	0.4156085194			
9.8258250354	0.430427726			
16.996036462	0.4472681427			
29.495374776	0.4651619295			
47.751247092	0.4918743146			
59.942715731	0.5081520336			
66.585856778	0.5170426572			
9999				
1NEUTRON2N1C	.18	.022	107.	
2N2N2B N2N1B	.1	.018	57.	
3C9N3E C9N3S	.12	.028	72.	
C1N3E	1.E7			0
C1N3S	1.E7			0
C2N3S	1.E7			0
C2N3E	1.E7			0
C3N3S	1.E7			0
C3N3E	1.E7			0

```

C5N3E          1.E7          0
C5N3S          1.E7          0
C6N3S          1.E7          0
C6N3E          1.E7          0
C7N3S          1.E7          0
C8N3S          1.E7          0
C9N3S          1.E7          0
C9N3E          1.E7          0
C8N3E          1.E7          0
C7N3E          1.E7          0
C4N3S          1.E7          0
C4N3E          1.E7          0
/SWITCH
C < n 1>< n 2>< Tclose ><Top/Tde >< Ie ><Vf/CLOP >< type >
  BARRAARSN9A          MEASURING          1
  BARRABRSN9B          MEASURING          1
  BARRACRSN9C          MEASURING          1
  FONTEABARRAA        -1.      1.E3          0
  FONTEBBARRAB        -1.      1.E3          0
  FONTECBARRAC        -1.      1.E3          0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14FONTEA  873.651342    60.          -1.      100.
14FONTEB  873.651342    60.      -120.    -1.      100.
14FONTEC  873.651342    60.      -240.    -1.      100.
/OUTPUT
  FONTEAFONTEBFONTEC
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK

```

APÊNDICE C

Tabela 19 – Tensão e Corrente do Cenário 1 (Modelo Base).

Cenário 1	
V (rms L-L)	I (Rms)
0,00	0,00
49,43	0,03
101,84	0,05
151,78	0,08
228,11	0,12
288,40	0,15
366,39	0,19
420,70	0,22
492,46	0,25
546,04	0,28
614,80	0,32
689,44	0,46
748,68	0,63
801,00	0,85
834,13	1,04
857,77	1,22
902,84	1,72
927,10	2,13
952,98	2,79
1003,90	5,33
1018,90	6,64
1026,60	7,39
1032,80	8,07
1040,00	8,90
1047,00	9,75
1073,00	13,37

Tabela 20 – Tensão e Corrente do Cenário 2 ($\alpha = 0,5$).

Cenário 2	
V (rms L-L)	I (Rms)
0,00	0,00
49,43	0,02
101,84	0,04
151,78	0,06
228,11	0,09
288,40	0,11
366,39	0,14
420,70	0,17
492,46	0,21

Cenário 2	
V (rms L-L)	I (Rms)
546,04	0,28
614,80	0,40
689,44	0,60
748,68	0,86
801,00	1,21
834,13	1,52
857,77	1,88
902,84	3,18
927,10	4,20
952,98	6,00
1003,90	12,46
1018,90	14,97
1026,60	16,47
1032,80	17,66
1040,00	19,03
1047,00	20,38
1073,00	26,02

Tabela 21 – Tensão e Corrente do Cenário 3 ($\alpha = 0,3$).

Cenário 3	
V (rms L-L)	I (Rms)
0,00	0,00
49,43	0,02
101,84	0,04
151,78	0,06
228,11	0,09
288,40	0,12
366,39	0,15
420,70	0,17
492,46	0,21
546,04	0,27
614,80	0,39
689,44	0,58
748,68	0,80
801,00	1,09
834,13	1,33
857,77	1,57
902,84	2,26
927,10	2,82
952,98	3,72
1003,90	7,25
1018,90	9,01

Cenário 3	
V (rms L-L)	I (Rms)
1026,60	9,99
1032,80	10,90
1040,00	12,01
1047,00	13,14
1073,00	17,90

Tabela 22 – Tensão e Corrente do Cenário 4 (R min, L min).

Cenário 4	
V (rms L-L)	I (Rms)
0,00	0,00
49,43	0,03
101,84	0,05
151,78	0,08
228,11	0,11
288,40	0,14
366,39	0,18
420,70	0,21
492,46	0,24
546,04	0,28
614,80	0,41
689,44	0,59
748,68	0,82
801,00	1,13
834,13	1,37
857,77	1,59
902,84	2,24
927,10	2,80
952,98	3,67
1003,90	7,12
1018,90	9,10
1026,60	10,30
1032,80	11,23
1040,00	12,19
1047,00	13,05
1073,00	16,45

Tabela 23 – Tensão e Corrente do Cenário 5 (R max, L max).

Cenário 5	
V (rms L-L)	I (Rms)
0,00	0,00
49,43	0,03

Cenário 5	
V (rms L-L)	I (Rms)
101,84	0,05
151,78	0,08
228,11	0,11
288,40	0,14
366,39	0,18
420,70	0,21
492,46	0,24
546,04	0,28
614,80	0,41
689,44	0,59
748,68	0,82
801,00	1,12
834,13	1,37
857,77	1,59
902,84	2,24
927,10	2,79
952,98	3,65
1003,90	6,99
1018,90	8,88
1026,60	10,04
1032,80	10,99
1040,00	11,92
1047,00	12,81
1073,00	16,09

Tabela 24 – Tensão e Corrente medida do Cenário 6 (R min, L max).

Cenário 6	
V (rms L-L)	I (Rms)
0,00	0,00
49,43	0,03
101,84	0,05
151,78	0,08
228,11	0,11
288,40	0,14
366,39	0,18
420,70	0,21
492,46	0,24
546,04	0,28
614,80	0,41
689,44	0,59
748,68	0,82
801,00	1,12

Cenário 6	
V (rms L-L)	I (Rms)
834,13	1,37
857,77	1,59
902,84	2,24
927,10	2,79
952,98	3,65
1003,90	6,98
1018,90	8,86
1026,60	10,02
1032,80	10,97
1040,00	11,91
1047,00	12,79
1073,00	16,06

Tabela 25 – Tensão e Corrente do Cenário 6 (R max, L min).

Cenário 7	
V (rms L-L)	I (Rms)
0	0
49,43	0,03
101,84	0,05
151,78	0,08
228,11	0,11
288,40	0,14
366,39	0,18
420,70	0,21
492,46	0,24
546,04	0,28
614,80	0,41
689,44	0,59
748,68	0,82
801,00	1,13
834,13	1,37
857,77	1,59
902,84	2,25
927,10	2,80
952,98	3,68
1003,90	7,14
1018,90	9,14
1026,60	10,34
1032,80	11,27
1040,00	12,22
1047,00	13,09
1073,00	16,51

Tabela 26 – Tensão e Corrente do Cenário 8 (Extrapolação).

Cenário 8	
V (rms L-L)	I (Rms)
0,00	0,00
49,43	0,02
101,84	0,03
151,78	0,05
228,11	0,07
288,40	0,09
366,39	0,12
420,70	0,14
492,46	0,17
546,04	0,22
614,80	0,33
689,44	0,50
748,68	0,69
801,00	0,95
834,13	1,16
857,77	1,37
902,84	1,98
927,10	2,50
952,98	3,34
1003,90	6,70
1018,90	8,42
1026,60	9,39
1032,80	10,26
1040,00	11,39
1047,00	12,51
1073,00	17,13

Tabela 27 – Tensão e Corrente do Cenário 9 (Modelo Final).

Cenário 9	
V (rms L-L)	I (Rms)
0,00	0,00
49,43	0,02
101,84	0,04
151,78	0,06
228,11	0,08
288,40	0,11
366,39	0,14
420,70	0,16
492,46	0,18
546,04	0,22

Cenário 9	
V (rms L-L)	I (Rms)
614,80	0,34
689,44	0,50
748,68	0,69
801,00	0,95
834,13	1,17
857,77	1,37
902,84	1,97
927,10	2,52
952,98	3,38
1003,90	6,65
1018,90	8,25
1026,60	9,19
1032,80	10,03
1040,00	11,16
1047,00	12,35
1073,00	17,22